

SÉRIE A, N° 1737
N° D'ORDRE : 2603

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

H. DJOUDAT

Licencié ès Sciences

1^{re} THÈSE. — PHOTOMÉTRIE HÉTÉROCHROME DES LAMPES A INCANDESCENCE.

FIXATION D'UNE ÉCHELLE DE TEMPÉRATURES DE COULEUR.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le juillet 1937, devant la Commission d'Examen

10 JUIL 1937

MM. CH. FABRY, *Président.*

E. DARMOIS }
G. RIBAUD } *Examineurs.*

Editions de la *Revue d'Optique théorique et instrumentale*

3 et 5, Boulevard Pasteur, Paris (XV^e)

1937

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

H. DJOUDAT

Licencié ès Sciences

1^{re} THÈSE. — PHOTOMÉTRIE HÉTÉROCHROME DES LAMPES A INCANDESCENCE.

FIXATION D'UNE ÉCHELLE DE TEMPÉRATURES DE COULEUR.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le juillet 1937, devant la Commission d'examen

MM. CH. FABRY, *Président.*

E. DARMOIS }
G. RIBAUD } *Examineurs.*

Editions de la *Revue d'Optique théorique et instrumentale*

3 et 5, Boulevard Pasteur, Paris (XV^e)

1937

FACULTE DES SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE PARIS

MM.

Doyen honoraire . . . M. MOLLIARD.

Doyen C. MAURAIN, *Professeur*, Physique du Globe.

<i>Professeurs honoraires</i>	H. LEBESGUR.	FREUNDLER.	MARCHIS.
	A. FERNBACH.	AUGER.	VESSIOT.
	Emile PICARD.	BLAISE.	PORTIER.
	Léon BRILLOUIN.	DANGEARD.	MOLLIARD
	GUILLET.	LESPIEAU.	LAFIQUE.
	PÉCHARD.		

PROFESSEURS

G. BERTRAND . . .	T Chimie biologique.	ROBERT-LÉVY . . .	T Physiologie comparée.
M. CAULLERY . . .	T Zoologie (Evolution des êtres organisés).	F. PICARD	Zoologie (Evolution des êtres organisés).
G. URBAIN	T Chimie générale.	Henri VILLAT . .	T Mécanique des fluides et applications.
Emile BOREL . . .	T Calcul des probabilités et Physique mathématique.	Ch. JACOB	T Géologie.
Jean PERRIN . . .	T Chimie physique.	P. PASCAL	T Chimie minérale.
H. ABRAHAM . . .	T Physique.	M. FRÉCHET . . .	T Calcul différentiel et calcul intégral.
E. CARTAN	T Géométrie supérieure.	E. ESCLANGON . .	T Astronomie.
A. COTTON	T Recherches Physiques.	M ^{me} RAMART-LUCAS.	T Chimie organique.
J. DRACH	T Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	H. BÉGHIN	T Mécanique physique et expérimentale.
Charles FABRY . .	T Physique générale.	FOCH	Mécanique expérimentale des fluides.
Charles PÉREZ . .	T Zoologie.	PAUTHENIER . . .	Physique (P. C. B.).
Léon BERTRAND .	T Géologie structurale et géologie appliquée.	De BROGLIE . . .	T Théories physiques.
E. RABAUD	T Biologie expérimentale.	CHRÉTIEN	Optique appliquée.
M. GUICHARD . . .	Chimie minérale.	P. JOB	Chimie générale.
Paul MONTEL . . .	T Théorie des fonctions et Théorie des transformations.	LABROUSTE . . .	Physique du Globe.
P. WINTREBERT .	T Anatomie et histologie comparées.	PRENANT	Zoologie.
L. BLARINGHEM .	T Botanique.	VILLEY	Mécanique physique et expérimentale.
O. DUBOSQ	T Biologie maritime.	BOHN	Zoologie (P. C. B.).
G. JULIA	T Mécanique analytique et Mécanique céleste.	COMBES	T Physiologie végétale.
C. MAUGUIN . . .	T Minéralogie.	GARNIER	T Mathématiques générales.
A. MICHEL-LÉVY .	T Pétrographie.	PÉRÈS	Mécanique des fluides.
H. BÉNARD	T Mécanique expérimentale des fluides.	HACKSPILL	Chimie (P. C. B.).
A. DENJOY	T Application de l'Analyse à la Géométrie.	LAUGIER	T Physiologie générale.
L. LUTAUD	T Géographie physique et géologie dynamique.	TOUSSAINT	Technique Aéronautique.
Eugène BLOCH . .	T Physique théorique et physique céleste.	M. CURIE	Physique (P. C. B.).
G. BRUHAT	Physique.	G. RIBAUD	T Hautes températures.
E. DARMOIS . . .	Enseignement de Physique.	CHAZY	T Mécanique rationnelle.
A. DEBIERNE . . .	T Physique Générale et Radioactivité.	GAULT	Chimie (P. C. B.).
A. DUFOUR	T Physique (P. C. B.).	CROZE	Recherches Physiques.
L. DUNOYER . . .	Optique appliquée.	DUPONT	T Théories chimiques.
A. GUILLIERMOND	T Botanique.	LANGUINE	Géologie.
M. JAVILLIER . . .	Chimie biologique.	VALIRON	Mathématiques générales.
L. JOLEAUD	Paléontologie.	BARRABÉ	Géologie structurale et géologie appliquée.
		MILLOT	Zoologie (P. C. B.).
		F. PERRIN	Théories physiques.
		VAVON	Chimie organique.
		G. DARMOIS . . .	Calcul des Probabilités et Physique mathématique.

Secrétaire A. PACAUD.

Secrétaire honoraire . . . D. TOMBECK.



A SA MAJESTÉ IMPÉRIALE

REZA SHAH PAHLAVI



Digitized by the Internet Archive
in 2026

A MON MAÎTRE M. GUSTAVE RIBAUD

Professeur à la Sorbonne

Hommage de mon profond respect et témoignage de ma plus vive reconnaissance.

A MA FAMILLE

PREMIÈRE PARTIE

UNE SOLUTION DU PROBLÈME DE LA PHOTOMÉTRIE HÉTÉROCHROME DES LAMPES A INCANDESCENCE

SOMMAIRE. — Nous avons effectué le passage des étalons primaires, constitués par des lampes à filament de carbone, aux étalons secondaires par la méthode indiquée par M. G. RIBAUD.

La méthode comporte :

1° Une comparaison homochrome de la lampe à étalonner (alimentée à bas régime) avec les étalons primaires fondamentaux ;

2° Une mesure spectrophotométrique effectuée sur la lampe elle-même pour une seule longueur d'onde voisine de la longueur d'onde de CROVA.

Ces deux données expérimentales permettent le calcul de l'intensité lumineuse de la lampe sous n'importe quel régime.

Les comparaisons photométriques sont faites à l'aide de cellules à couche d'arrêt au sélénium et les mesures spectrophotométriques à l'aide d'un spectrophotomètre de précision construit au Laboratoire de Hautes Températures.

La précision obtenue dans l'étalonnage de la lampe est de 1/500.

La méthode permet, également, la mesure relativement directe de la transmission lumineuse totale des filtres bleus internationaux actuellement utilisés en photométrie.

Le résultat obtenu dans cette partie s'accorde de façon satisfaisante avec ceux obtenus par d'autres méthodes.

CHAPITRE I.

INTRODUCTION

Le problème de photométrie qui intéresse le plus, actuellement, les techniciens, est celui de la mesure, en bougies internationales, de l'intensité lumineuse des lampes à filaments de tungstène dont la température de couleur T est notablement supérieure à celle des lampes à filaments de carbone qui servent comme étalon primaire.

Pour résoudre ce problème de photométrie hétérochrome, on a proposé trois méthodes :

1° **Méthode par échelons.** — Le passage des étalons primaires aux étalons secondaires peut se faire par l'intermédiaire de sources lumineuses dont les tempé-

ratures de couleur vont en croissant, depuis celle de l'étalon fondamental jusqu'à celle de la source à étalonner, chaque échelon comportant une différence de couleur suffisamment faible pour que la comparaison photométrique directe des deux plages reste satisfaisante.

Aucune étude d'ensemble n'a été publiée sur cette méthode, dont la précision se trouve évidemment influencée par l'accumulation des mesures photométriques.

2° Méthode des filtres. -- On utilise des filtres bleus qui transforment le rayonnement d'une source de température de couleur T_0 en un rayonnement de température de couleur T . En munissant les sources servant d'étalon primaire d'un tel filtre, on transforme son rayonnement de façon à pouvoir faire des comparaisons photométriques homochromes entre cette source munie de filtres et la source à étalonner.

La solution du problème, de cette manière, n'est complète que si l'on a étudié, au préalable, la transmission lumineuse du filtre employé.

3° La troisième méthode est celle proposée par M. le Prof. FLEURY ⁽¹⁾ dès 1924 à la Réunion de Genève de la Commission internationale de l'Eclairage. Elle consiste à utiliser deux corps noirs, l'un à la température de fusion du platine, par conséquent à la température de couleur voisine de celle des lampes carbone, l'autre à la température de couleur de la lampe à incandescence à étalonner. La mesure au photomètre de l'intensité lumineuse du corps noir à la température de couleur des lampes carbone, la mesure du rapport pour une certaine longueur d'onde λ des intensités spectrales du corps noir, aux températures T et T_0 , et enfin la comparaison photométrique de la lampe à incandescence à étalonner et du corps noir à la température T , fournissent les éléments nécessaires pour le calcul de l'intensité lumineuse de la lampe.

M. le Prof. RIBAUD a montré ⁽²⁾ que la mesure de l'intensité lumineuse d'une lampe à filament de tungstène peut s'effectuer, sans intervention du corps noir, par une seule mesure spectrophotométrique effectuée *sur la lampe elle-même*.

Principe de la méthode utilisée. — Considérons une lampe à filament de tungstène dans le vide : portons-la successivement aux températures de couleur 2080° K et 2360° K. Mesurons, pour une longueur d'onde λ_0 , le rapport N_0 des intensités spectrales de la lampe sous les deux régimes.

En désignant par ε et ε_0 les pouvoirs émissifs de couleur de la lampe et par S et S_0 les surfaces utiles du filament sous les deux régimes, le rapport N des intensités spectrales de la lampe pour une longueur d'onde λ est donné par les relations :

(1) Thèse. *Ann. de phys.*, t. 5 (1926), p. 265.

(2) G. RIBAUD, *Revue d'Optique théorique et instrumentale*, t. 12 (1933), p. 193.

$$(1) \quad \varepsilon S e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} = N \varepsilon_0 S_0 e^{-\frac{C_2}{\lambda T_0}}$$

En rapprochant cette relation de celle écrite pour la longueur d'onde λ_0 , on a :

$$(2) \quad \lambda \log \left(N \frac{\varepsilon_0 S_0}{\varepsilon S} \right) = \lambda_0 \log \left(N_0 \frac{\varepsilon_0 S_0}{\varepsilon S} \right),$$

équation qui permet le calcul de N pour chaque longueur d'onde.

En se basant sur les propriétés thermiques du tungstène qui sont suffisamment bien connues, M. RIBAUD a montré que si l'on effectue la mesure du rapport N pour la longueur d'onde de CROVA ($\lambda_C = 5766 \text{ \AA}$), tout se passe comme si l'extrapolation était faite par l'intermédiaire du corps noir. Dès lors, N sera calculé, pour chaque longueur d'onde, par la formule : $\log N = \frac{\lambda_0}{\lambda} \log N_0$.

Ayant ainsi calculé N , on calculera le rapport I_h/I_b des intensités lumineuses de la lampe sous les deux régimes (régime haut et régime bas), par la formule :

$$\frac{I_h}{I_b} = \frac{\int_0^\infty N W(\lambda, T_0) V_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty W(\lambda, T_0) V_\lambda d\lambda}$$

où $W(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}$ (fonction de WIEN) (*), et V_λ = facteur de visibilité relative de l'œil normal.

Ce rapport permettra le calcul de I si l'on mesure l'intensité de la lampe à bas régime en comparaison avec les étalons primaires.

Le principe de la méthode nous indique les étapes expérimentales dans l'ordre où elles doivent être franchies :

1° Détermination du régime bas ;

2° Comparaison photométrique de la lampe en régime bas avec les étalons fondamentaux (lampes étalons à filament de carbone ou corps noir au point de solidification du platine) ;

3° Mesure du rapport N des intensités spectrales de la lampe pour la longueur d'onde de CROVA ou pour une longueur d'onde voisine.

(*) Dans tout ce qui suit, la fonction de WIEN sera désignée par $W(\lambda, T)$.

CHAPITRE II.

DÉTERMINATION DU « RÉGIME BAS »

On entend par « régime bas » le régime auquel la température de couleur de la lampe est égale à celle des lampes à filament de carbone ⁽¹⁾ ; par conséquent, la détermination dudit régime s'effectue par une méthode de détermination de la température de couleur. A cet effet, nous avons opéré par la méthode dite « méthode de l'identité de couleur », qui consiste à agir sur le régime de la lampe de façon à l'amener à identité de couleur avec la lampe à filament de carbone en se servant d'un photomètre (LUMMER-BRODHUN).

Le montage employé est le même qui sert habituellement en photométrie visuelle : sur un banc photométrique, on met de part et d'autre du photomètre la lampe à étalonner et une lampe carbone. On agit, en même temps que sur le régime de la lampe à étudier, sur les distances respectives des lampes au photomètre, jusqu'à obtention de l'identité de couleur. Il est à noter que la distance des lampes n'intervient que pour la raison de commodité des mesures.

Nous avons fait la détermination en prenant une lampe carbone du Bureau of Standards, n° 5274 ($T_c = 2080^\circ \text{ K}$). L'intensité correspondant à l'identité de couleurs dans la lampe à filament de tungstène a pour valeur 0,7130 A et son voltage environ 78 V.

Mesures photométriques au régime bas. — Le régime bas de la lampe étant déterminé, il s'agit de mesurer son intensité lumineuse en comparaison avec les lampes à filament de carbone qui servent comme étalon primaire.

Etant donné que la lampe à filament de tungstène alimenté sous le régime bas émet une lumière de distribution spectrale très voisine de celle des lampes carbone, les comparaisons photométriques peuvent être effectuées visuellement ou à l'aide d'une cellule photoélectrique.

Dispositifs expérimentaux. — Dans le cas des mesures visuelles, le montage optique est identique à celui qu'on emploie ordinairement en photométrie. Sur un banc photométrique de 3 m, 50 sont montés, de part et d'autre d'un photomètre LUMMER-BRODHUN du type courant, la lampe à étalonner et une lampe étalon carbone.

Dans le cas des mesures à la cellule photoélectrique à couche d'arrêt, celle-ci remplace, sur le banc, la plage du photomètre ; les deux lampes sont montées sur un chariot, fixé perpendiculairement au banc et permettant la substitution très rapide des deux lampes.

(1) Ou à celle du corps noir « platine ».

Lampes étalons. — Dans nos mesures, nous avons utilisé un groupe de lampes étalons qui provenaient du Bureau of Standards et qui avaient déjà servi à M. RIBAUD dans ses mesures de la brillance du corps noir à la température de fusion du platine ; elles fonctionnent sous un voltage d'environ 50 volts ; leur intensité lumineuse (spécifiée dans une direction déterminée et à une distance de 1 m, 20 de la plage photométrique) est d'environ 18 bougies.

Nous avons procédé à une comparaison de ces lampes entre elles. Comme le montre le tableau ci-dessous, leur intensité lumineuse relative n'a pas subi de variations dépassant 3/1000 de l'intensité.

N° des lampes	Intensités nominales fournies par le B. of S.	Intensités déduites de nos mesures		Moyenne
		mars 1934	novembre 1936	
5273	17,72 bd	17,64 bd	17,74 bd	17,70 $\pm$ 0,04 bd
5274	17,63	17,66	17,74	17,67 $\pm$ 0,06
5278	17,94	17,92	17,87	17,91 $\pm$ 0,04
5289	17,91	17,98	17,85	17,91 $\pm$ 0,07
Moyenne.....	17,80	17,80	17,80	17,80

Mesures photométriques.

1^o **Mesures à la cellule à couche d'arrêt.** — Nous avons effectué plusieurs séries de mesures en nous servant d'une cellule à couche d'arrêt. La lampe à filament de carbone est toujours placée à 1 m, 20 de la cellule ; on déplace la lampe à étalonner de façon à obtenir le même éclairement sur la cellule, ce qui se traduit par la même force électromotrice photoélectrique mesurée aux bornes d'un potentiomètre (1).

La distance de la lampe carbone à la cellule est mesurée à l'aide d'un étalon à bout de 1 m, 20 de longueur ; le déplacement de la lampe à étalonner se lit sur la règle graduée portée par le banc d'optique.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs obtenues pour l'intensité lumineuse de la lampe à bas régime en comparaison avec quatre lampes étalons :

N° de la lampe étalon carbone	Intensité obtenue pour la lampe W. F. 6
5289	18,83 bd
5274	18,81
5278	18,78
5290	18,87
	18,82 $\pm$ 0,04

(1) Nous reviendrons sur ces mesures dans la 3^e partie, consacrée à l'emploi des cellules photoélectriques à couche d'arrêt.

La précision atteinte est celle avec laquelle l'intensité des lampes carbone est définie.

Les valeurs de l'intensité de la lampe à bas régime, obtenues en comparaison avec une seule lampe carbone à différentes époques, s'accordent entre elles avec une grande précision, ainsi qu'en fait état la table ci-dessous (la lampe carbone employée étant la lampe n° 5278) :

Dates des expériences	Intensités obtenues pour la lampe à bas régime
avril 1934	18,78 bd
avril 1935	18,77
mai 1935	18,78
novembre 1936	18,80

Cette table nous montre, de plus, qu'en se servant avec modération d'une lampe à filament de tungstène, les variations de son intensité lumineuse sont, sinon nulles, du moins négligeables, étant donnée la précision qu'on peut atteindre actuellement dans les mesures photométriques.

2° Mesures visuelles. — Nous avons effectué les mêmes mesures en nous servant d'un photomètre LUMMER-BRODHUN.

Dans ces mesures, l'égalisation photométrique des plages s'obtenait en déplaçant le photomètre. La distance de la lampe carbone au photomètre est toujours de 1 m, 20 environ.

Les résultats obtenus s'accordent avec ceux obtenus dans les mesures à la cellule avec une précision supérieure à 1/1500.

CHAPITRE III.

SPECTROPHOTOMÈTRE

Le problème de la spectrophotométrie a déjà fait l'objet de nombreuses études, de sorte qu'on peut fixer, par des considérations théoriques déjà établies, les qualités que doit posséder un spectrophotomètre appelé à servir dans chaque cas particulier.

Dans le cas qui nous occupe, où nous avons à mesurer le rapport de deux brillances, les propriétés demandées de l'appareil sont :

1° Pouvoir de définition. — On entend par pouvoir de définition la précision avec laquelle on peut déterminer la bande spectrale utilisée dans les mesures.

Il est illusoire de chercher à accroître la précision des mesures photométriques si, en même temps, on ne définit pas la longueur d'onde utilisée avec une rigueur suffisante.

Examinons, par exemple, le cas de l'extrapolation aux températures élevées :

Soit b_1 la brillance spectrale du corps noir de référence à la température T_1 , b_2 la brillance du corps noir à la température T_2 , que l'on veut mesurer. La mesure spectrophotométrique nous donnera la valeur R du rapport.

On a, d'autre part, d'après la loi de WIEN :

$$b_1 = W(\lambda, T_1)$$

$$b_2 = W(\lambda, T_2),$$

d'où, en remplaçant $W(\lambda, T)$ par sa valeur, et en passant aux logarithmes, on tire :

$$\log_n R = \frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right);$$

en différentiant :

$$\frac{dR}{R \log_n R} = \frac{d\lambda}{\lambda}.$$

Pour $R = 3$, $\log_n R \cong 1$.

Si l'on veut connaître R à 1/1000 près, λ doit être connue à 5 Å près pour $\lambda = 5000$ Å.

La dernière équation montre que la définition de λ doit être d'autant plus rigoureuse que R est plus grande.

2° **Clarté.** — Le problème de la clarté est d'une importance essentielle dans certains cas particuliers où la luminosité des sources à étudier est petite. Du point de vue général, une bonne clarté de l'appareil est nécessaire si l'on veut pouvoir utiliser des bandes spectrales assez étroites pour que les corrections de largeur de fente soient négligeables (1).

On peut gagner sur la clarté de l'appareil, en même temps que sur l'élimination de la lumière parasite, en simplifiant, autant que possible, le système optique ; en particulier, la suppression du système oculaire augmente la clarté de 20 % environ ; ceci a été fait dans notre appareil.

3° **Dimensions angulaires du champ photométrique.** — Pour pouvoir effectuer de bonnes mesures et pour éviter la fatigue de l'observation, les dimensions angulaires du champ photométrique ne doivent pas être trop petites. La valeur limite généralement admise est de 3° ; dans notre appareil, cet angle n'est que de 2° ; cependant il donne une impression de confort largement suffisant.

(1) RIBAUD et PEYCHÈS, *Revue d'Optique*, t. 11 (1932), p. 241.

Systèmes de réduction.

Pour procéder à l'égalisation photométrique, il faut pouvoir faire varier de façon continue l'intensité d'un des faisceaux.

Le choix du moyen de réduction doit être fait de façon qu'on ne nuise pas aux autres qualités du spectrophotomètre. D'autre part, les appareils de réduction doivent être, autant que possible, des appareils absolus, c'est-à-dire que la mesure de leur transmission ne doit pas comporter de mesures photométriques préliminaires.

Nous citerons, sommairement, les systèmes de réduction généralement employés :

1° **Réduction au moyen d'un diaphragme.** — Un diaphragme de largeur variable placé sur un faisceau peut servir comme moyen de réduction. Le système n'est employé que rarement. On ne peut pas s'en servir pour les mesures de haute précision.

2° **Verres neutres.** — Les verres neutres, couramment employés en pyrométrie, taillés en forme de coin, peuvent servir comme moyen de réduction continu. Ces verres absorbent une grande quantité de lumière, et leur emploi demande un étalonnage préalable et une étude rigoureuse de la transmission spectrale.

3° **Appareils de polarisation.** — Un système de deux appareils de polarisation constitue un moyen de réduction d'utilisation commode.

Ces appareils coûteux absorbent beaucoup de lumière et ils accroissent la quantité de la lumière diffuse. De plus, ils peuvent introduire de grandes erreurs si la lumière d'un des faisceaux est partiellement polarisée. Le montage d'un nicol tournant entre deux nicols fixes ne présente pas ce dernier inconvénient, mais accroît les premiers.

Cependant, en raison de la commodité de leur emploi, les appareils de polarisation sont employés couramment.

4° **Secteurs tournants.** — L'emploi des secteurs tournants, en photométrie visuelle, repose sur une loi énoncée par TALBOT.

Pour avoir un moyen de réduction continue, on utilise des secteurs dont on peut faire varier l'ouverture pendant la rotation : mais ces appareils ne sont pas suffisamment précis. De plus, leur fonctionnement exige des mécanismes souvent compliqués. Il vaut mieux utiliser des secteurs dont les ouvertures, munies de biseaux rectilignes soigneusement dressés, aient été mesurées avec précision à la machine à diviser.

Un tel jeu de secteurs à ouvertures croissant en progression géométrique (fig. 1) ne constitue pas un moyen de réduction continue.

Nous avons interpolé, au début de nos mesures, en agissant sur le courant



Fig. 1 a)

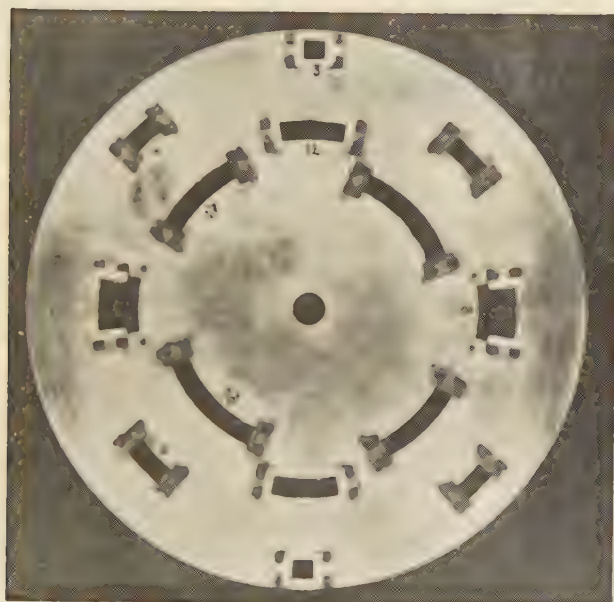


Fig. 1 b)

d'alimentation de la lampe tare ; cela nécessitait un étalonnage de la lampe tare, que nous avons effectué de la manière suivante :

Nous avons interposé, sur le trajet du faisceau provenant de la lampe tare, des secteurs ayant pour ouvertures des facteurs de transmission 0,8 0,9 1 et nous avons réalisé l'égalisation en agissant sur le courant tare. Ces trois points nous

donnent la courbe d'étalonnage de la lampe tare. La courbe obtenue peut être représentée avec une très grande approximation par l'équation :

$$\frac{J}{J_0} = 1 + 2,138 (I - I_0) + 3,62 (I - I_0)^2$$

(I en ampères)

J étant la brillance de la lampe tare correspondant au courant I.

Cette méthode d'interpolation, nécessitant des mesures photométriques supplémentaires, réduit la précision du résultat final.

Pour éviter l'inconvénient de la méthode développée ci-dessus, nous avons employé un secteur tournant (fig. 2) possédant un profil tel que sa transmission τ

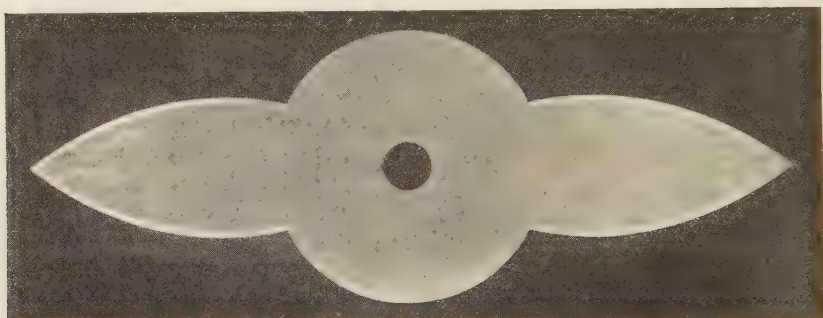


FIG. 2.

soit une fonction linéaire du déplacement du secteur devant le faisceau tare.

Le calcul de ce profil est très simple.

Le centre C du faisceau tare balaie un arc A B d'ouverture 2ω sur la surface du secteur.

On a :

$$\tau = 1 - \frac{2\omega}{\pi}$$

On veut que τ soit une fonction linéaire de $CE = x$, c'est-à-dire :

$$\tau = mx + n$$

Pour $x = 0$; $\tau = 1$; pour $x = 10$ cm, $\tau = 0,7$; d'où

$\tau = 1 - 0,03 x$ x étant exprimé en centimètres.

On a :

$$\frac{d\tau}{\tau} = - \frac{0,03 dx}{1 - 0,03 x}$$

$$\text{Pour } \tau = 1, \quad \frac{d\tau}{\tau} = - 0,03 dx ; \quad \text{pour } \tau = 0,7, \quad \frac{d\tau}{\tau} = \frac{0,03 dx}{0,7}.$$

C'est-à-dire qu'une erreur de 1/4 de millimètre sur la connaissance de la position du secteur donnera toujours τ à mieux que 1/1000.

Le profil du secteur se détermine par points.

On a :

$$Oa = X = \rho \cos \omega$$

$$aA = Y = \rho \sin \omega.$$

En posant $OE = R$, comme on a, d'autre part, $\omega = 0,015 \pi x$, on obtient X et Y , en fonction de x :

$$X = (R - x) \cos 0,015 \pi x.$$

$$Y = (R - x) \sin 0,015 \pi x.$$

Pour les mesures, on place le secteur à ouverture fixe sur le faisceau principal et le secteur variable sur le faisceau tare. Si τ_1 est la transmission du premier et τ_2 celle du deuxième, tout se passe comme si on avait un seul secteur de transmission $\tau = \frac{\tau_1}{\tau_2}$.

Description de l'appareil (1).

Le montage optique est analogue à celui de Ives (2). Il est réalisé sur une plateforme en fonte très rigide (fig. 3).

Le faisceau issu de la lampe à étalonner traverse un objectif de microscope, réglable en hauteur et en largeur, destiné à donner de la grille de la lampe une image réduite, de façon que celle-ci se place **ENTIÈREMENT** à l'intérieur de la fente d'entrée. Ce faisceau est rendu parallèle par une première lentille : il traverse le cube de LUMMER, puis est repris par une deuxième lentille qui redonne l'image réduite de la grille sur la fente d'entrée verticale A.

Les deux lentilles, le cube de LUMMER, et une troisième lentille destinée à rendre parallèle le faisceau provenant de la lampe tare, sont placés à l'intérieur d'une boîte B étanche à la poussière.

Une lentille C donne du filament de la lampe tare, placée dans un cylindre, étanche à la lumière, une image sur le plan de rotation du secteur variable E.

La position du filament tare est réglable en largeur, en longueur et en hauteur.

Cette partie du système optique donne l'image de la lampe à étalonner et celle de la lampe tare sur la fente d'entrée.

L'image de la lampe tare est diaphragmée en hauteur par une fente réglable horizontale, condition essentielle pour avoir une bonne ligne de séparation des plages.

Un prisme à réflexion totale placé derrière la fente d'entrée permet de contrôler, à l'aide d'un microscope, la position de l'image de la grille à l'intérieur de la fente. Pour les mesures, on escamote ce prisme.

(1) Communication faite à la 5^e Réunion, année 1935, de l'Institut d'Optique, le 18 juin 1935.

(2) Ives, *Phys. Rev.*, 30 (1910), 446.

Le faisceau principal et le faisceau tare suivent ensuite le même trajet dans le spectroscopie.

Le spectroscopie est constitué par : une lentille collimatrice de 450 mm de distance focale, un prisme à déviation constante en flint lourd d'indice $N_D = 1,7$

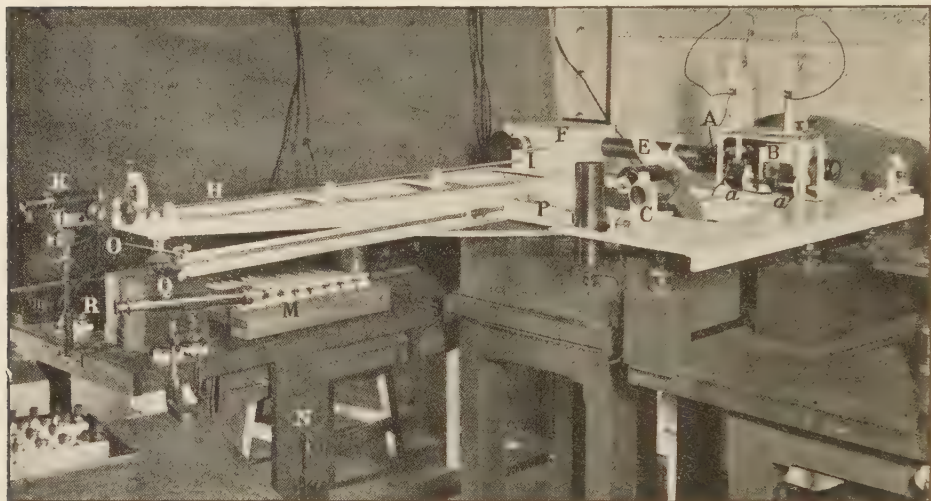


FIG. 3.

environ, dont la face d'entrée (la petite face) mesure 65 mm, et une lentille de sortie de 120 cm de distance focale.

Ces deux lentilles et le prisme sont enfermés dans une boîte F étanche à la poussière.

La rotation du prisme est commandée par un bouton moleté et une tige d'acier H. Un tambour gradué placé en I permet un repérage approximatif de la longueur d'onde. La détermination précise de la longueur d'onde utilisée se fait en se servant d'un spectre de raies fourni par un tube luminescent, tube au néon ou à l'hélium dans nos expériences. La lumière émise verticalement par le tube est rendue horizontale par un prisme à réflexion totale ; elle est ensuite renvoyée par le cube de LUMMER sur la fente d'entrée A.

Pour le réglage de l'appareil en longueurs d'onde, on fait tourner le prisme jusqu'à ce que les bords de l'image monochromatique de la fente d'entrée coïncident avec les bords de la fente de sortie dont on vise le plan à l'aide d'un microscope K. Pour les mesures spectrophotométriques, on enlève le microscope.

Comme nous l'avons signalé plus haut, le système oculaire est supprimé ; les mesures se font en plaçant l'œil contre la fente de sortie. L'image des plages se forme à 50 cm en avant de la fente de sortie.

L'appareil permet d'utiliser des bandes spectrales très étroites ; pour une bande de 25 angströms à 5764 Å, la largeur de la fente d'entrée est de 0,25 mm et celle de la fente de sortie de 0,9 mm.

Le réglage du courant dans la lampe tare se fait par un rhéostat à fiches M et un rhéostat à tige plongeant dans du mercure, dont on voit en N la crémaillère de commande à portée de la main de l'observateur.

Pour réduire le flux du faisceau principal, nous avons employé un secteur tournant à plusieurs ouvertures dont les coefficients de transmission varient en progression géométrique de raison 0,8. Ce secteur permet de réduire le flux dans un rapport connu. L'égénération photométrique est parachevée par le déplacement du secteur variable E. Ce déplacement est commandé par la rotation d'une manivelle O. La position du secteur par rapport à l'axe du faisceau tare se lit sur une échelle graduée P à l'aide d'une lunette Q. Pour placer convenablement le zéro de l'échelle P, on a percé sur le secteur variable, à 105 mm de la pointe E, un trou de 0,2 mm de diamètre. Ce trou étant éclairé par le faisceau tare, lorsque son image se fait sur la fente d'entrée A, la division 105 de la règle P, portée par le chariot mobile, doit se trouver en face de l'index fixe.

Le secteur à ouverture fixe, placé sur le faisceau principal, et son moteur à entraînement, sont fixés rigidement sur un même support qui repose par l'intermédiaire de plusieurs matelas de feutre et de caoutchouc sur la même table que le spectrophotomètre et la lampe à étalonner. Les vibrations sont parfaitement amorties et ne se transmettent pas aux autres parties du montage.

Le secteur variable, son moteur d'entraînement et le dispositif de déplacement sont posés sur un socle indépendant de la table du spectrophotomètre.

Afin d'accroître la sécurité des mesures, nous avons employé la méthode du « contraste dans le temps » indiquée par J. MENDOUSSE.

La réalisation de « contraste dans le temps » peut être faite de deux manières différentes :

a) Dans le circuit de la lampe tare, on dispose, en plus du rhéostat de réglage, une petite résistance que l'on peut court-circuiter par un interrupteur à mercure. La valeur de cette résistance fixe est calculée de façon que sa mise hors du circuit de la lampe tare augmente la brillance de celle-ci de 8 % environ.

b) On peut interposer sur le faisceau tare une lame de verre escamotable qui absorbe environ 8 % du flux tare. Lorsqu'on introduit puis escamote la lame de verre, on voit alternativement la plage tare plus foncée puis plus brillante que la plage correspondante du faisceau à mesurer.

Quel que soit le procédé de contraste employé, on règle la position du secteur variable de façon à égaliser les contrastes obtenus, ce qui se fait avec une très grande facilité.

Dans notre montage, la lame de verre est fixée sur une tige de fer mobile suivant l'axe de deux électro-aimants a et a' . L'alimentation des électro-aimants, et

par conséquent le déplacement de la tige porte-lame, sont commandés par deux boutons poussoirs situés en R à portée de la main gauche de l'observateur.

Ces dispositifs de contraste permettent l'emploi d'un cube à une seule ligne de séparation horizontale, ce qui est un avantage dans le cas de notre montage où, les dimensions de la fente d'entrée étant très petites ($0,25 \times 0,40$ mm), l'obtention d'une ligne de séparation fine est déjà difficile. L'emploi d'un cube à contrastes, du fait de la diffraction, altérerait encore davantage la finesse de la ligne de séparation des plages.

CHAPITRE IV.

MESURES SPECTROPHOTOMÉTRIQUES

La mesure consiste à déterminer le rapport N_0 des brillances spectrales de la lampe sous les deux régimes, pour une longueur d'onde λ_0 voisine de la longueur d'onde de CROVA.

Nous avons utilisé, dans nos mesures, la longueur d'onde $5764 \text{ \AA}$ (raie jaune du néon), suffisamment voisine de la longueur d'onde de CROVA pour ne pas entraîner d'erreurs appréciables. De cette façon, le repérage de la longueur d'onde utilisée dans les mesures devient extrêmement simple.

Dans une première série d'expériences, l'égénéralisation photométrique des plages s'obtenait en agissant sur le courant d'alimentation de la lampe tare.

On porte la lampe à étalonner, successivement à son régime bas et à son régime haut (régime normal). Son flux étant réduit dans un rapport connu par un secteur à ouverture fixe de facteur de transmission convenablement choisi, on procède à l'égénéralisation photométrique. On détermine les courants I_b et I_h de la lampe tare, correspondant respectivement aux deux régimes.

La différence $(I_h - I_b)$ portée dans l'équation d'étalonnage de la lampe tare nous fournit le rapport $\frac{J_h \tau}{J_b}$ (τ désigne le facteur de transmission du secteur, J_h et J_b les brillances de la lampe sous les deux régimes): d'où l'on tire, en posant $\frac{J_h \tau}{J_b} = r$:

$$N_0 = \frac{r}{\tau}.$$

Dans une deuxième série d'expériences, l'égénéralisation photométrique s'obtenait en déplaçant le secteur variable disposé sur le faisceau tare que nous avons décrit dans le paragraphe précédent. Si τ_1 est la transmission de ce secteur pour l'égénéralisation au régime bas, τ_2 sa transmission correspondant à l'égénéralisation au régime haut, le rapport r s'écrit :

$$r = \frac{\mathcal{J}_h \tau}{\mathcal{J}_b} = \frac{\tau_2}{\tau_1} \quad \text{d'où} \quad N_0 = \frac{\tau_2}{\tau_1 \tau}.$$

Dans nos mesures, le facteur de transmission du secteur à ouverture fixe était de 0,409 75.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs obtenues pour r et N_0 .

	Dates	r	N_0
Interpolation à l'aide de la lampe tare étalonnée	22 janvier 1935	1,0815	2,6394
	29 janvier 1935	1,0785	2,6320
	1 ^{er} avril 1935	1,0830	2,6430
	2 avril 1935	1,0785	2,6320
	5 avril 1935	1,0785	2,6320
Interpolation à l'aide du secteur à angle variable.....	20 juin 1935	1,0780	2,6310
	21 juin 1935	1,0810	2,6386
	2 juillet 1935	1,0790	2,6336
		1,079	2,6350 $\pm$ 0,004

La moyenne des mesures spectrophotométriques effectuées par plusieurs observateurs en 1936 est de $N_0 = 2,633$. En prenant la moyenne des deux résultats, on a $N_0 = 2,634 \pm 0,001$.

CHAPITRE V.

CALCUL DE L'INTENSITÉ LUMINEUSE DE LA LAMPE SOUS SON RÉGIME NORMAL (régime haut).

Le rapport N_0 des intensités spectrales de la lampe étant déterminé pour la longueur d'onde λ_0 , il s'agit de calculer le rapport $R = \frac{I_h}{I_b}$ des intensités lumineuses de la lampe sous les deux régimes, rapport qui est donné par :

$$R = \frac{\int_0^\infty N W(\lambda, T_0) V_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty W(\lambda, T_0) V_\lambda d\lambda}.$$

Pour le calcul des intégrales de ce rapport, on peut faire une sommation de termes pris pour des intervalles égaux à 100 Å, par exemple.

Nous nous sommes dispensé de faire ces calculs en utilisant les tables publiées par le Bureau of Standards (1), donnant les luminosités spectrales du corps noir :

$$I_\lambda = W(\lambda, T) V_\lambda.$$

(1) *Skogland Miscellaneous Publications*, n° 86.

Dans la table n° 3, les luminosités L_λ sont multipliées par un coefficient choisi de façon que la somme des termes étendue à tout le spectre visible soit égale à l'unité. Ainsi, ayant calculé N par la formule : $\log N = \frac{\lambda_0}{\lambda} \log N_0$, on obtient le rapport R en faisant la sommation des termes $N_\lambda h_\lambda$:

$$R = \frac{\sum_0^\infty \tilde{N}_\lambda L_\lambda}{\sum_0^\infty L_\lambda} = \sum_0^\infty N_\lambda h_\lambda.$$

Pour la lampe W. F. 6, nous avons trouvé $N_0 = 2,635$; $I_b = 18,82$ bougies ; le calcul donne : $R = 2,633$, ce qui entraîne $I_h = 49,56$ bougies.

Remarquons que la valeur trouvée pour R est très voisine de celle de N_0 ; cela était à prévoir étant donné la définition même de la longueur d'onde de CROVA, et l'utilisation dans nos mesures de la longueur d'onde $5764 \text{ \AA}$, voisine de celle de CROVA ⁽¹⁾.

En pratique, on peut adopter $R = N_0$ sans que cela entraîne d'erreurs appréciables.

CHAPITRE VI.

DÉTERMINATION DU FACTEUR DE TRANSMISSION DU VERRE BLEU INTERNATIONAL R. 2-28.

Le problème du passage des étalons primaires, constitués par les lampes à filament de carbone, aux étalons secondaires est résolu, dans une certaine mesure, par l'emploi des filtres colorés. Ces filtres, associés aux lampes à filaments de carbone, modifient le rayonnement de ces lampes de façon que la température de couleur de l'ensemble, lampe carbone + filtre, soit égale à celle des lampes à filament de tungstène dans le vide.

La comparaison des étalons secondaires avec les étalons fondamentaux devient, par l'emploi de ces filtres, un problème de photométrie homochrome dont la solution ne comporte aucune difficulté, à condition d'avoir étudié, au préalable, le facteur de transmission du filtre employé. Ce facteur de transmission a été mesuré pour quatre verres bleus, dans divers laboratoires nationaux, par trois méthodes différentes dont nous indiquerons brièvement les principes, ci-dessous.

1° Directement par comparaison hétérochrome, en égalisant deux brillances au moyen d'un photomètre.

(1) Voir la discussion dans le travail de M. RIBAUD, *loc. cit.*, p. 197.

L'une des plages du photomètre étant éclairée par une lampe tare de température de couleur convenablement choisie, l'autre plage sera éclairée successivement par la source servant d'étalon primaire et par la même source associée au verre filtre.

La méthode présente l'inconvénient de la photométrie hétérochrome, qui est l'insuffisance de la précision des mesures.

2° Par comparaison hétérochrome directe, au moyen du photomètre à scintillation.

3° Par un calcul en partant des données suivantes :

transmissions spectrales du filtre ;

luminosités spectrales du corps noir à la température de couleur des étalons primaires.

Les résultats obtenus par ces trois méthodes, employées toutes les trois dans des laboratoires différents, ont été comparés, à plusieurs reprises. L'accord parmi ces résultats n'a pas été satisfaisant. La méthode qui a conduit aux résultats les mieux concordants est la méthode spectrophotométrique, les autres méthodes conduisant à des écarts qui dépassent 2 %.

La méthode dont nous nous sommes servi pour étalonner en bougies internationales une lampe à filament de tungstène fournit un moyen assez direct pour la mesure du facteur de transmission de ces filtres. Cette mesure comporte :

- a) une comparaison photométrique de la lampe à bas régime avec un étalon carbone ;
- b) une comparaison de la lampe à régime normal avec le même étalon carbone associé au filtre bleu de facteur de transmission τ ;
- c) l'extrapolation spectrophotométrique faite sur la lampe.

Ces trois mesures conduisent aux rapports expérimentaux suivants :

$$\frac{I_b}{I_c} = A, \quad \frac{I_c \tau}{I_h} = B, \quad \frac{I_h}{I_b} = R,$$

d'où l'on déduit :

$$\tau = A \cdot B \cdot R.$$

Comme ces rapports le montrent, la valeur de l'intensité de l'étalon carbone utilisé dans la mesure n'intervient pas dans le résultat.

Nos mesures ont porté sur le verre R. 2-28 mis obligeamment à notre disposition par M. JOUAUST, Sous-directeur du Laboratoire Central d'Electricité. Elles doivent être faites visuellement, en raison du fait que la sensibilité spectrale des cellules photoélectriques s'écarte considérablement de celle de l'œil ; par conséquent celles-ci ne peuvent servir, avec sécurité, pour les mesures photométriques que dans les cas particuliers où les rayonnements à comparer ont la même distribution spectrale.

Nous avons employé les mêmes lampes carbone qui avaient servi pour mesurer l'intensité lumineuse de la lampe à filament de tungstène W. F.6. alimentée sous le régime bas.

Le tableau ci-dessous donne les résultats obtenus :

No de la lampe	Résultats obtenus en mai 1935				Résultats obtenus en novembre 1936				Moyennes
	A	B	R	τ	A	B	R	τ	
5274	1,065	0,1858	2,633	0,5209	—	—	2,633	—	0,5209
5278	1,048	0,1880	»	0,5175	1,052	0,1883	»	0,5217	0,5196
5289	1,050	0,1894	»	0,5233	1,052	0,1879	»	0,5194	0,5213
									0,5206 + 0,001

La valeur obtenue pour τ est assez différente de la valeur actuellement adoptée (0,5245), qui est la moyenne des résultats spectrophotométriques obtenus en 1926 et 1932. Mais elle s'accorde avec les valeurs obtenues par d'autres méthodes, qui sont les méthodes directes. Nous reproduisons, à titre d'indication, la moyenne des valeurs obtenues par différentes méthodes dans les Laboratoires Nationaux qui ont entrepris l'étude de la transmission des filtres bleus (1).

Photomètre (LUMMER-BRODHUN)	0,5280 $\pm$ 0,007
Photomètre à scintillation	0,5206 $\pm$ 0,007
Photomètre à éclipses	0,5210 $\pm$ 0,001
Spectrophotomètre 1926	0,5228
— 1932	0,5260
{ 0,5244 $\pm$ 0,0016	

Variation du facteur de transmission avec la température de couleur de la source utilisée. — La transmission τ du filtre bleu pour une source de température de couleur T_c est donnée par la formule :

$$\tau = \frac{\int_0^\infty \tau_\lambda I_\lambda^{T_c} d\lambda}{\int_0^\infty L_\lambda^{T_c} d\lambda} = \sum_0^\infty \tau_\lambda I_\lambda^{T_c}.$$

Nous avons calculé τ pour les températures 2000, 2080 et 2160° K en prenant les transmissions données dans les procès-verbaux des séances du Comité international des Poids et Mesures (2).

On a :

$T_c = 2000$	$\tau = 0,5228$
$T_c = 2080$	$\tau = 0,5245$
$T_c = 2160$	$\tau = 0,5262$

Comme on le voit, la variation de la transmission est suffisamment faible pour ne pas entraîner d'erreurs appréciables lorsque la température de couleur de la

(1) Procès-verbaux du Comité International des Poids et mesures, t. 16 (1933), 296.
(2) Loc. cit., p. 320.

source utilisée n'est pas connue avec une très grande précision. Une erreur de 25° sur la température de couleur correspond à une erreur de 1/1000 sur la transmission du filtre, ce qui est tout à fait négligeable étant donnée la précision avec laquelle τ est connu.

Influence de la température du filtre sur sa transmission lumineuse totale.

On sait que la transmission des verres colorés subit des variations quelquefois importantes lorsqu'on fait varier leur température. Il nous a semblé utile d'étudier s'il en est de même pour le filtre bleu. A cet effet, celui-ci est placé dans un thermostat et sa transmission est mesurée à l'aide d'une cellule à couche d'arrêt pour des températures croissant de 20 à 40° C.

On place une lampe carbone à une distance fixe de la cellule et on détermine la distance à laquelle il faut placer une lampe à filament de tungstène, servant de tare, pour que le flux envoyé par celle-ci sur la cellule soit égal au flux envoyé par la lampe carbone munie du filtre.

La distance de la lampe carbone à la cellule étant de 1 m, 20 environ, voici la table donnant la distance de la lampe tare :

Température du filtre en °C	Distance de la lampe tare à la cellule
19,6	2745 mm
30,6	2746
33,0	2746
32,0	2746
42,0	2744

Il s'ensuit que la transmission totale du filtre ne subit aucune modification sensible dans les limites étudiées.

ANNEXE

Longueur d'onde de Crova.

La longueur d'onde de CROVA est, par définition, la longueur d'onde pour laquelle le rapport des intensités spectrales de deux corps noirs est le même que le rapport des intensités lumineuses (brillances blanches) de ces deux corps noirs, c'est-à-dire que, I et I_0 étant respectivement les intensités lumineuses du corps noir aux températures T et T_0 , on doit avoir :

$$(1) \quad \frac{I}{I_0} = \frac{\int_0^\infty b_\lambda^T V_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty b_\lambda^0 V_\lambda d\lambda} = \frac{b_{\lambda_c}^T}{b_{\lambda_c}^0}$$

où b_{λ}^T = brillance spectrale du corps noir pour la longueur d'onde λ à la température T ;

$b_{\lambda_C}^T$ = brillance du corps noir pour la longueur d'onde de CROVA ;

V_{λ} = facteur de visibilité relative de l'œil normal.

La connaissance de cette longueur d'onde facilite considérablement les calculs.

Nous avons calculé les valeurs de λ_C pour $T_0 = 2080^{\circ}$ K et pour différentes valeurs de T allant jusqu'à 2900° K.

Jusqu'à la température $T = 2400^{\circ}$ K, le calcul a été fait en s'aidant de la table des luminosités relatives publiée par le Bureau of Standards⁽¹⁾. Dans cette table, comme il a été spécifié précédemment, les luminosités ($b_{\lambda}^T V_{\lambda}$) sont multipliées par un coefficient k_T tel que la somme des termes $k_T b_{\lambda}^T V_{\lambda}$ soit égale à l'unité :

$$k_T \sum b_{\lambda}^T V_{\lambda} = \sum k_T b_{\lambda}^T V_{\lambda} = \sum l_{\lambda}^T = 1.$$

En rapprochant cette relation de celle donnant le rapport des intensités, on a :

$$(2) \quad \frac{I}{I_0} = \frac{\sum_0^{\infty} b_{\lambda}^T V_{\lambda}}{\sum_0^{\infty} b_{\lambda}^0 V_{\lambda}} = \frac{k_0 \sum_0^{\infty} l_{\lambda}^T}{k_T \sum_0^{\infty} l_{\lambda}^0} = \frac{k_0}{k_T}$$

$$(3) \quad \frac{I}{I_0} = \frac{k_0}{k_T} = \frac{b_{\lambda_C}^T}{b_{\lambda_C}^0} = \frac{k_0 l_{\lambda_C}^T}{k_T l_{\lambda_C}^0}$$

d'où l'on déduit :

$$l_{\lambda_C}^T = l_{\lambda_C}^0.$$

Par conséquent, pour la longueur d'onde de CROVA, λ_C est le même pour toutes les températures. On cherchera, sur la table, la longueur d'onde pour laquelle l_{λ} est le même à toute température. Cette longueur d'onde est la longueur d'onde de CROVA.

Comme sur la table indiquée plus haut, les valeurs de λ ne sont données que tous les 100 Å ; pour la recherche de λ_C , on doit faire le calcul ci-dessous :

Soient ($l_{\lambda}^T, b_{\lambda}^T$) et ($l_{\lambda}^0, b_{\lambda}^0$) les luminosités relatives (lues sur la table) et les brillances spectrales du corps noir, pour une longueur d'onde quelconque, respectivement aux températures T et T_0 , on a :

$$(4) \quad l_{\lambda}^0 = k_0 b_{\lambda}^0 V_{\lambda} \quad l_{\lambda}^T = k_T b_{\lambda}^T V_{\lambda}$$

d'où :

$$(5) \quad \frac{k_0}{k_T} = \frac{l_{\lambda}^0 b_{\lambda}^T}{l_{\lambda}^T b_{\lambda}^0} = \frac{b_{\lambda_C}^T}{b_{\lambda_C}^0}$$

(1) Voir page 25.

et :

$$(6) \quad \frac{b_{\lambda C}^T b_{\lambda}^0}{b_{\lambda C}^0 b_{\lambda}^T} = \frac{l_{\lambda}^0}{l_{\lambda}^T}.$$

En remplaçant b_{λ}^T par $C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}$ et en simplifiant, la relation (6) s'écrit :

$$(7) \quad e^{C_2 \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \left(\frac{1}{\lambda_C} - \frac{1}{\lambda} \right)} = \frac{l_{\lambda}^0}{l_{\lambda}^T}$$

Enfin, en passant aux logarithmes, on a :

$$(8) \quad \frac{1}{\lambda_C} - \frac{1}{\lambda} = \frac{\log \frac{l_{\lambda}^0}{l_{\lambda}^T}}{C_2 \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}$$

Cette relation permet le calcul précis de la longueur d'onde de CROVA et, inversement, la connaissance de la longueur d'onde λ_C permet le calcul des coefficients k et par conséquent, l'établissement facile des tables de (l_{λ}) à n'importe quelle température.

A partir de 2400° K, nous avons fait le calcul direct en faisant la sommation des intégrales de la relation (1).

Les valeurs de λ_C , ainsi calculées, sont données dans la table ci-dessous. On voit que λ_C varie, avec une grande précision, linéairement avec la température. L'équation (9) donne λ_C en fonction de la température.

$$(9) \quad \lambda_C = 5903,37 - 0,058 T.$$

T_0 °K	T °K	λ en Å	
2080	2160	5779	Calculé à l'aide de la relation (9)
»	2240	5774	»
»	2320	5768	»
»	2300	5770	Calcul direct par sommation
»	2400	5763	Calculé à l'aide de la relation (9)
»	2600	5753	Calcul direct
»	2900	5735	»

D'une façon générale, dans les limites pratiquement utiles ($T_0 = 1800$ à 2200° K, $T = 1800$ à 3500° K), λ_C est une fonction linéaire de T_0 et T . L'équation (10) donne λ_C en fonction de T_0 et T , dans les limites précisées ci-dessus :

$$(10) \quad \lambda_C = 6059 - 0,075 T_0 - 0,058 T.$$

DEUXIÈME PARTIE

FIXATION D'UNE ÉCHELLE DE TEMPÉRATURES DE COULEUR

SOMMAIRE. — Nous avons étalonné une série de lampes incandescentes en températures de couleur.

La méthode employée est celle dite « méthode de l'identité de couleur ».

Le corps noir de référence utilisé pour les comparaisons colorimétriques est constitué par un four à tube chauffant en carbone permettant de porter l'enceinte réalisant les conditions du corps noir jusqu'à 3000° C.

La mesure de la température du corps noir se fait à l'aide d'un pyromètre de précision qu'on a étalonné soigneusement en se servant des points fixes thermométriques (points de fusion de l'or et du platine).

L'expérience montre que la température de couleur des lampes incandescentes varie, dans les grands intervalles de température (600°), en fonction linéaire de l'intensité du courant et en fonction parabolique de la tension.

L'échelle de températures de couleur, constituée par le groupe de lampes incandescentes étalonnées par comparaison directe avec le corps noir, peut être considérée en accord avec l'échelle légale de hautes températures, à 4° près, et cela dans toute son étendue (1900°-2800° K).

CHAPITRE I.

MÉTHODE EMPLOYÉE

La température de couleur d'un corps incandescent est, par définition, la température d'un corps noir dont la lumière émise a la même couleur que celle de la source étudiée. La détermination de la température de couleur d'une telle source peut être effectuée par plusieurs méthodes dont nous allons passer en revue les principes :

1° Méthode radiométrique. — On détermine, en se servant d'un spectroradiomètre ou, de préférence, d'un spectrophotomètre, la répartition spectrale de l'énergie émise, dans le spectre visible, par la source à étudier. Cette détermination faite, il est aisé de rechercher, par la méthode graphique par exemple, la température du corps noir émettant une lumière de même répartition spectrale que la source. Cette température est la température de couleur du corps incandescent ⁽¹⁾.

(1) Gustave RIBAUD, *Traité de pyrométrie optique*, p. 125 (Voir l'accord des résultats fournis par les diverses méthodes).

La méthode a été employée par plusieurs expérimentateurs, pour la comparaison du rayonnement des corps non noirs à celui du corps noir, avant même qu'on ait donné une définition précise de la température de couleur. C'est ainsi qu'elle a été utilisée en 1903 par ANGSTRÖM (1) pour l'étude de la distribution du rayonnement de la lampe HEFNER.

L'auteur s'était servi d'un spectrobolomètre et avait montré que la brillance spectrale de l'étalon HEFNER est représentée, à un facteur constant près, par une formule identique à celle de WIEN.

LEDER (2) en 1907 a repris la même étude en se servant d'un spectrophotomètre et d'un corps noir de référence. Le résultat de ses mesures s'accorde excellemment avec celui obtenu par ANGSTRÖM (3).

2° **Méthode pyrométrique.** — On peut tracer la courbe de répartition spectrale de la source en se servant d'un spectropyromètre, ou simplement d'un pyromètre muni de trois verres colorés (rouge, vert, bleu), qui donne directement les brillances spectrales.

3° **Méthode du rapport « rouge-bleu »** (4). — La méthode du rapport rouge-bleu a été établie par FORSYTHE (5). Elle consiste, étant donnée une source, à déterminer, pour deux longueurs d'onde λ_1 et λ_2 , le rapport des brillances spectrales $b_{\lambda_1 T} / b_{\lambda_2 T}$. La température du corps noir possédant pour ces mêmes longueurs d'onde des brillances $b_{\lambda_1 T_C}^0$ et $b_{\lambda_2 T_C}^0$ dont le rapport $b_{\lambda_1 T_C}^0 / b_{\lambda_2 T_C}^0$ est égal à $b_{\lambda_1 T} / b_{\lambda_2 T}$, est la température de couleur de la source à étudier.

H. KORTE (6) a fixé récemment une échelle de températures de couleur par une méthode basée sur le même principe que la méthode du rapport rouge-bleu, mais dont la procédure expérimentale en diffère par le fait que l'emploi du corps noir de référence est supprimé. La détermination du rapport $b_{\lambda_1 T} / b_{\lambda_2 T}$ ou plus exactement du rapport $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b_{\lambda} d\lambda : \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} b_{\lambda} d\lambda$, est faite en se servant d'un monochromateur combiné à un thermoélément. L'auteur détermine, à l'aide de son spectroradiomètre, le rapport R pour différentes valeurs de (λ_1, λ_2) et (λ_3, λ_4) , et recherche dans les tables dressées spécialement la température du corps noir possédant les mêmes rapports de brillances spectrales que la source.

4° **Méthode de l'identité de couleur** (7). — La méthode est absolument conforme à la définition donnée plus haut de la température de couleur. Elle consiste à

(1) ANGSTRÖM. L'énergie dans le spectre visible de l'étalon HEFNER, UPSAL, 1903 ; *Phys. Rev.*, 17 (1903), 302.

(2) LEDER, *Ann. der Phys.*, 424 (1907), 308.

(3) G. RIBAUD, *Traité de pyrométrie optique*, p. 116.

(4) « Red-blue Ratio » dans les publications américaines.

(5) FORSYTHE, *Journ. Opt. Soc. Amer.*, 7 (1923).

(6) H. KORTE. Thèse de Doctorat de l'Université de Berlin, 14 octobre 1936.

(7) « Color match » dans les publications américaines.

rechercher, par la comparaison visuelle directe, la température du corps noir dont la lumière émise produit sur l'œil la même sensation de couleur que celle de la lumière émise par la source à étudier.

Cette méthode a été utilisée, en premier, par MORRIS, STROUDE et ELLIS (1), pour la comparaison des lampes à incandescence.

Ils comparaient, à l'aide d'un photomètre à contrastes, les lumières émises par différentes lampes et admettaient que celles-ci étaient portées à la même température lorsque la couleur des lumières émises était la même.

Remarquons que, jus qu'à cette époque, aucune définition exacte de la température de couleur n'avait été donnée. Ce sont HYDE, GADY et FORSYTHE (2) qui donnèrent, les premiers, la définition précise de la température de couleur et montraient la concordance parfaite existant entre les résultats obtenus par la méthode de l'identité de couleur et les autres méthodes.

La méthode de l'identité de couleur étant celle qui conduit aux résultats les plus sûrs a été utilisée dans plusieurs laboratoires pour la fixation de différentes échelles de températures de couleur. De plus, cette méthode demande l'emploi des appareils les plus simples.

La mesure de la température de couleur des sources très chaudes par la méthode de l'identité de couleur nécessite l'emploi de corps noir à des températures élevées. Or, la réalisation du corps noir aux températures dépassant 2000° K. ne semble pas facile à l'aide d'un four quelconque.

On peut franchir la difficulté par l'emploi des filtres spectraux qui, associés au corps noir à basse température, modifient la distribution spectrale de son rayonnement d'une façon telle que le rayonnement filtre ait la même composition spectrale que la lumière émise par le corps noir à une température plus élevée.

La réalisation de tels filtres ne comporte aucune difficulté si l'on envisage le problème seulement du point de vue colorimétrique. Mais, dans l'état actuel des choses, on ne peut pas réaliser avec une très grande précision des filtres possédant une transmission énergétique voisine. Nous discuterons brièvement dans ce qui suit la réalisation pratique réalisée par DUNSTON (3) en vue de mesures de très hautes températures.

Le rayonnement à filtrer est polarisé par un nicol à champ normal N_1 (0,2 U). La lumière ainsi polarisée traverse une lame de quartz Q_1 , d'épaisseur convenable et taillée perpendiculairement à l'axe optique. Cette lame fait tourner le plan de polarisation de chaque radiation simple d'un angle qui est une fonction continue de la longueur d'onde. Le rayonnement est reçu, ensuite, par un deuxième nicol N_2 , qui adoublait différemment les divers rayons. Une lame de quartz Q_2 identique à Q_1 et un troisième nicol N_3 complètent le filtre.

(1) MORRIS, STROUDE et ELLIS, *Electrician*, 59 (1907), p. 584.

(2) HYDE, GADY et FORSYTHE, *Phys. Rev.*, sér. II, vol. 10 (1917), p. 395.

(3) PRIEST, *Journ. Opt. Soc. Amer.*, vol. 7 (1923), p. 1175.

Pour une épaisseur de 0,5 mm des lames de quartz, le rayonnement filtré est représenté par : $b_{\lambda} = C e^{\frac{\alpha}{\lambda}}$ ($\alpha > 0$).

Il s'ensuit que, si la lumière incidente est noire, la lumière émergente l'est également, et la température de couleur du rayonnement émergent est donnée par :

$$\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_c} = \frac{\alpha}{C_2},$$

où

T_0 = température du rayonnement incident ;

T_c = température de couleur du rayonnement émergent ;

C_2 = constante de la formule de WIEN ;

α étant positif, T sera plus grande que T_0 .

WENSEL, JUDD et ROESER (1) ont fixé par la méthode de l'identité de couleur une échelle de températures de couleur actuellement utilisée au Bureau of Stan-

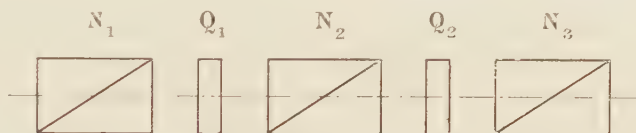


FIG. 1. — Schéma du montage de Priest.

dards. Ils ont déterminé la température de couleur d'une série de lampes à filament de tungstène en comparaison avec le corps noir plongé dans des bains métalliques en fusion.

Nous avons utilisé la méthode de l'identité des couleurs.

CHAPITRE II.

DESCRIPTION DU MONTAGE ET DES APPAREILS UTILISÉS

Les comparaisons colorimétriques ont été faites à l'aide d'un photomètre du type courant (champ = 9° de largeur, 13° de hauteur). L'appareil comporte deux verres de contraste mobiles qui ont été supprimés dans nos mesures (2). Le photo -

(1) WENSEL, JUDD et ROESER, *Journ. of Research*, vol. 12 (1934), p. 527.

(2) D'après FORSYTHE (*Journ. Opt. Soc. Amer.*, 6 (1922), 476), la précision des mesures est meilleure à l'aide d'un photomètre à contraste. Cependant, nous avons observé, dans nos expériences, que l'emploi des contrastes dans les mesures de températures de couleur, sans en améliorer sensiblement la précision, cause une plus grande fatigue de l'observateur.

mètre n'intervient que pour comparer les couleurs des lumières émises par les deux sources sans se préoccuper de leurs intensités. Cependant, en raison de la commodité des mesures, il est préférable d'amener les deux plages photométriques au même éclairement. A cet effet, le photomètre est monté sur un banc d'optique de 3 m, 20 de longueur et son déplacement sur le banc permet d'égaliser l'éclairage des plages.

Le schéma du montage est donné sur la figure 2. L'une des plages du photomètre est éclairée par le four F réalisant les conditions du corps noir. Afin de pouvoir éclairer la plage photométrique seulement par le faisceau issu de la partie centrale du corps noir, on projette, à l'aide de la lentille L_1 , l'image du corps noir sur un diaphragme métallique D_1 . Les dimensions du trou du diaphragme étant

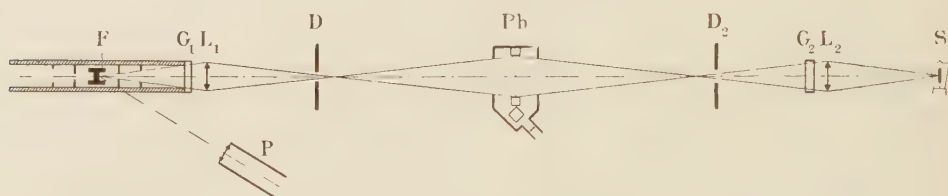


FIG. 2. — Schéma du montage réalisé pour la fixation de l'échelle de températures de couleur.

F : corps noir carboné. — L_1 , L_2 : lentilles. — D_1 , D_2 : diaphragmes. — Ph : photomètre. — P : pyromètre. — S : lampe à étudier. — G_1 , G_2 : lames de verre.

légèrement inférieures à celles de l'image de l'ouverture du corps noir, le champ photométrique est éclairé exclusivement par le faisceau central.

Le four F est monté sur un plateau mobile de façon qu'on puisse diriger son faisceau, soit vers le pyromètre, soit vers le photomètre.

L'autre plage du photomètre est éclairée par la lampe à étalonner. Le faisceau issu de cette lampe traverse une lentille L_2 et une glace G_2 , analogues respectivement à la lentille L_1 et à la glace G_1 de fermeture du four.

L'identité colorimétrique des deux parties du montage a été vérifiée en échangeant les lentilles L_1 et L_2 d'une part, et les glaces G_1 et G_2 d'autre part ; dans le résultat des mesures, on n'a décelé aucune modification appréciable. Remarquons que, si l'on remplace l'une des glaces G par un autre échantillon, différant du point de vue couleur de G, on n'obtient l'identité de couleur entre la lampe et le corps noir à aucune température.

Le réglage du courant dans la lampe s'effectue à l'aide de rhéostats à fiches associés à un rhéostat à curseur.

La mesure du courant et de la tension des lampes est faite au potentiomètre que nous décrirons dans le chapitre spécial.

La température du corps noir F est mesurée à l'aide d'un pyromètre à filament disparaissant P.

Description du pyromètre. — Dans nos mesures, nous avons utilisé un pyromètre HOLBORN et KURLBAUM à filament disparaissant et courant variable. L'appareil a été construit au Laboratoire de Pyrométrie de la Fondation Edmond de ROTHSCHILD, suivant les indications de M. le Professeur RIBAUD ⁽¹⁾ ; en voici les caractéristiques :

L'objectif O (figure 3) est un « Olor » BERTHIOT de distance focale 20 cm, d'ouverture maximum $f/5,7 = 35$ mm, formé de quatre lentilles et comprenant un diaphragme à iris entre les 2^e et 3^e lentilles. Une glissière G en permet les grands déplacements, la mise au point étant faite par une crémaillère C soigneusement travaillée. Le filament de la lampe tare, ainsi que l'image de la source visée, sont

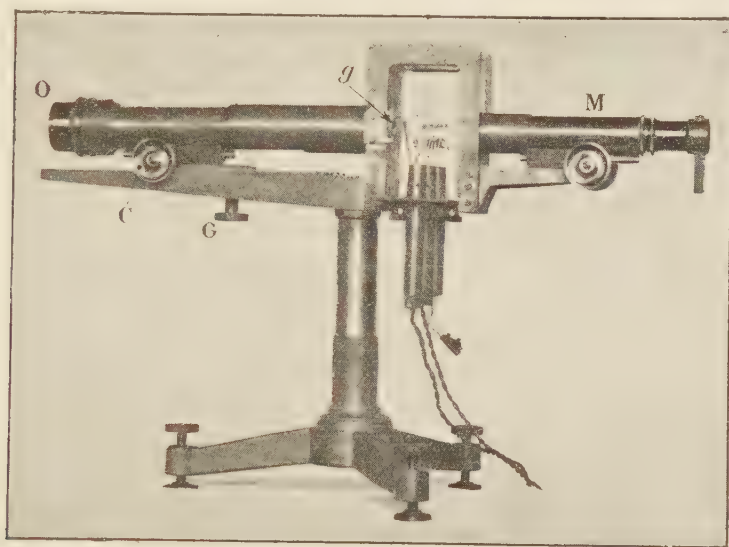


FIG. 3. — Pyromètre à disparition de filament et à courant variable.

observés à l'aide d'un microscope M grossissant 20 fois. L'oculaire contient un verre rouge Iena, f 4512, d'épaisseur 6 mm.

Les lampes tares comportent un filament cylindrique courbé en forme d'U renversé, de diamètre 0,065 mm à froid. La longueur totale du filament est d'environ 5 cm. Il possède, d'après l'étude de RIBAUD et NIKITINE ⁽²⁾, une zone d'uniformité suffisante ; du reste, pour les mesures, on n'utilise qu'une petite région du filament. Le filament est placé dans le vide et la température limite de son emploi est de 1800° K environ. Pratiquement, pour éviter le vieillissement des lampes, on ne dépasse pas 1500° K.

(1) G. RIBAUD, *Traité de pyrométrie optique*, p. 295.

(2) RIBAUD et NIKITINE, *Ann. de Phys.*, 7 (1927), 28.

Pour étendre la graduation du pyromètre aux températures élevées, on se sert des verres neutres ; trois verres neutres de densités approximativement 1, 2 et 3 sont montés sur deux glissières *g* placées devant la lampe tare. Ces verres permettent de passer du point de fusion de l'or aux températures 1550°, 1860° et 2300° K ; la température de brillance de la lampe restant comprise entre 1336° et 1550° K, la graduation du pyromètre s'étend de 1336° à 4600° K.

Vérification de l'étalonnage du pyromètre aux points fixes thermométriques. —

Le pyromètre que nous avons décrit plus haut a été étalonné soigneusement par J. MENDOUSSE ⁽¹⁾ au Laboratoire de Pyrométrie de la Fondation Edmond de ROTHSCHILD. Nous avons vérifié son étalonnage aux points de fusion de l'or et du platine par la méthode du corps noir plongé dans un bain de métal. Cette méthode, énoncée pour la première fois par BLONDEL ⁽²⁾ en 1898, consiste à plonger dans un bain de métal porté à la température de fusion une enceinte réalisant les conditions du corps noir. Elle présente sur les autres méthodes les avantages suivants :

a) La température du corps noir se trouve automatiquement stabilisée par suite de la chaleur latente de fusion.

b) Le métal, par suite de sa grande conductibilité calorifique, assure l'uniformité de la température de l'enceinte d'une façon excellente ; l'uniformité de la température à l'intérieur du four ne joue qu'un rôle secondaire.

Pour la discussion détaillée, nous renvoyons au *Traité de Pyrométrie optique* de M. RIBAUD ⁽³⁾.

Description du four. — Nous avons effectué la fusion des métaux en nous servant d'un four à induction à haute fréquence. Le schéma de l'installation est donné sur la figure 4. Pour l'étude de la théorie du chauffage par courants induits de haute fréquence, nous renvoyons à la Conférence du Professeur RIBAUD ⁽⁴⁾.

Nous donnons ci-dessous les caractéristiques des fours que nous avons préparés au laboratoire :

hauteur de l'enroulement : 16 cm ;

nombre total des spires : 25 ;

diamètre intérieur du solénoïde inducteur : 5 cm ;

nombre des spires sur la hauteur du creuset : 8.

Le solénoïde est constitué par un tube de cuivre de 5 mm de diamètre extérieur

(1) Réalisation de l'échelle internationale des hautes températures. *Ann. de Phys.*, 10^e série t. 16, octobre 1931.

(2) BLONDEL, *Eclair. Electr.*, 8 (1896), 348 ; Waidner et Burgess, *Electr. World*, 52 (1908), 6125.

(3) G. RIBAUD, *Traité de pyrométrie optique*, p. 255.

(4) *Journal de Phys. et Radium*, 3 (1932), 537-554.

et 3 mm de diamètre intérieur. Il est enroulé sur un tube de quartz de 19 cm de hauteur, de 3 mm d'épaisseur, de 50 mm de diamètre extérieur, de 44 mm de diamètre intérieur.

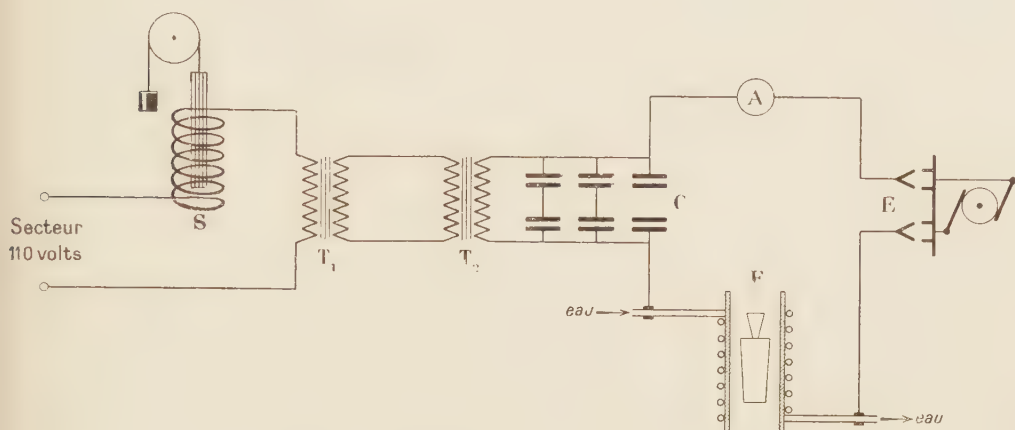


FIG. 4. — Schéma de l'installation de chauffage par courants induits de haute fréquence.

E : éclateur. — F : four. — A : ampèremètre haute fréquence. — C : condensateur. — T_1 , T_2 : transformateurs survolteurs. — S : self induction variable.

Réalisation du corps noir au point de fusion de l'or. — CREUSET ET ENCEINTE RAYONNANTE. — La fusion de l'or a été effectuée dans un creuset en graphite ACHESON (figure 5). L'enceinte rayonnante est également en graphite. Cette substance convient très bien pour la fusion de l'or ; elle ne communique à l'or aucune impureté même après de très nombreuses fusions, et de plus elle possède un pouvoir émissif élevé et une grande conductibilité calorifique.

Le creuset est formé par un cylindre de 45 mm de hauteur, 20 mm de diamètre extérieur et 13 mm de diamètre intérieur.

L'enceinte rayonnante est constituée par un cylindre de 35 mm de hauteur, 5 mm de diamètre extérieur et 2 mm de diamètre intérieur. Elle s'engage dans le trou pratiqué sur un bouchon en graphite qui se visse au creuset. Le bouchon est troué en son centre d'un trou de 1 mm, 5. Deux tubes coniques sont engagés dans le bouchon du creuset et servent pour les visées pyrométriques ; ils empêchent, en même temps, l'entrée du noir de fumée dans l'enceinte rayonnante.

Le calorifugeage est assuré au moyen de noir de fumée calciné à haute température.

Technique de l'expérience. — Afin de pouvoir franchir lentement le palier de fusion, on détermine, par une expérience préliminaire, le courant de chauffe du four de façon à provoquer un échauffement ou un refroidissement lent de la masse du métal. Cette opération une fois faite, il n'est plus besoin de la recommencer

tant que le four existe. Dans le cas de notre installation et au point de fusion de l'or, le courant primaire est réglé à 25 ampères pour la fusion et à 20 ampères pour la solidification. Sous ces régimes, la variation de la température du four est inférieure à 2° par minute.

Pour étalonner le pyromètre, on règle le courant de chauffe à 25 ampères (le

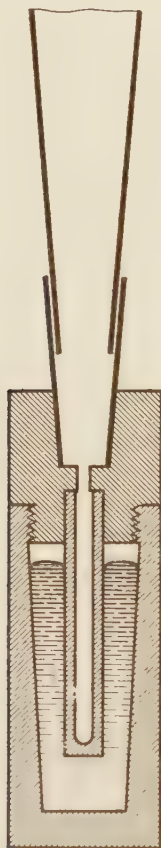


FIG. 5. — Schéma du creuset et du corps noir, utilisés au point de fusion de l'or, en grandeur naturelle.

palier de fusion est atteint au bout de 12 heure environ). On fait les pointés pyrométriques et on détermine le courant dans la lampe tare correspondant à l'égalisation des brillances.

Dans nos expériences, le palier durait environ 15 minutes : lorsqu'il était franchi, la température de l'enceinte noire montait assez rapidement.

On procède à la solidification du métal en amenant le courant de chauffe à 0 ampères. On observe le palier de solidification qui est, en général, extrêmement net. Les pointés pyrométriques à la solidification sont plus précis qu'à la

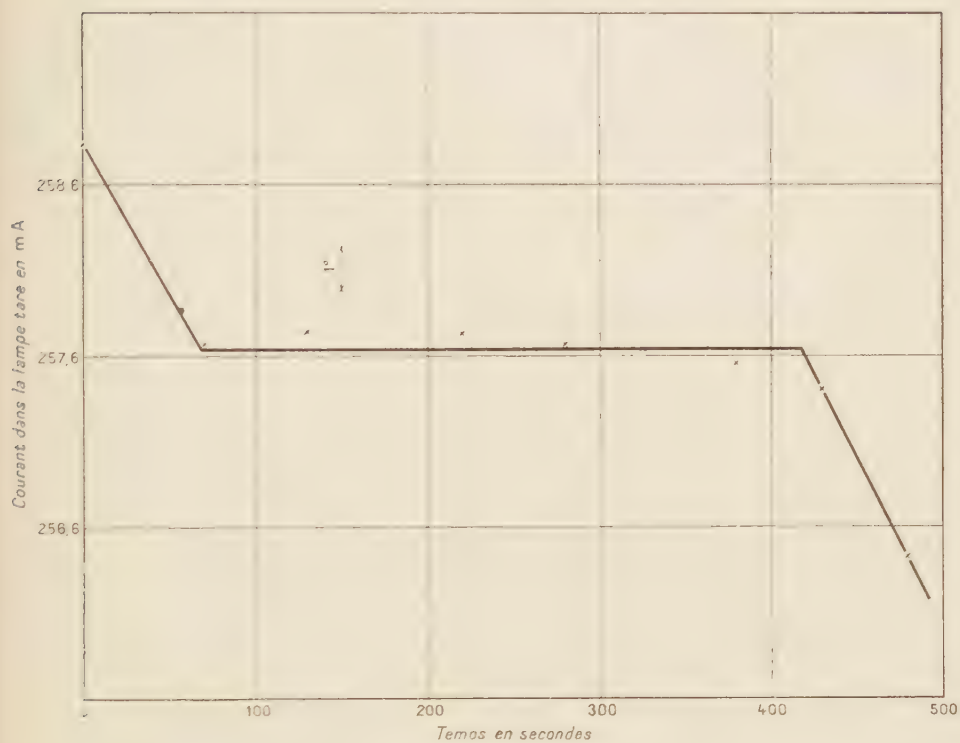


FIG. 6. — Diagramme de solidification de l'or.



FIG. 6 bis. — Diagramme de fusion de l'or.

fusion ; cela tient à ce que, dans le premier cas, l'enceinte noire se détache nettement sur le fond sombre du four, tandis qu'il n'en est pas de même dans le second cas, où on observe l'ouverture du corps noir assez difficilement à cause de la brillante élevée des parties avoisinantes.

On a donné sur les figures 6 et 6 *bis* les diagrammes de fusion et de solidification de l'or.

Résultats obtenus. — Nous résumons, dans le tableau ci-dessous, les résultats de nos expériences au point de fusion de l'or. On remarquera que le courant dans la lampe tare est toujours plus grand pour la fusion que pour la solidification ; cela tient, comme nous l'avons signalé plus haut, à ce que, dans le cas de la fusion, les pointés pyrométriques sont influencés par le rayonnement des parties avoisinant l'ouverture du corps noir, tandis que, dans le cas de la solidification, l'ouverture se détachant nettement sur le fond noir, les mesures s'effectuent exactement sur le corps noir.

Date de l'expérience	Courant dans la lampe tare	
	Fusion	Solidification
1936		
22 octobre	257,70 mA	257,63 mA
23 —	257,81	257,77
24 —	257,49	257,39
25 —	257,47	257,36
Moyenne	257,62	257,54

J. MENDOUSSE donne, pour le courant dans la lampe tare, au point de fusion de l'or, une moyenne de 257,49 mA, différente seulement de 0,05 mA de la moyenne que nous avons obtenue, ce qui présente une différence de 0°,2.

La conclusion qu'on peut tirer est que la graduation du pyromètre n'a pas subi de variation appréciable, si l'on tient compte de la dispersion des mesures qui atteint 0°,5.

Réalisation du corps noir au point de fusion du platine. — Le corps noir, au point de fusion du platine, est réalisé conformément aux spécifications du Bureau of Standards pour la reproduction de l'étalon WAIDNER et BURGESS [17].

La figure 7 donne le schéma du montage avec les indications des dimensions du creuset et du corps noir.

Les pièces réfractaires en thorine ont été fournies par la Deutsche Gold und Silber Scheideanstalt.

Le platine utilisé provient de la Maison MARRET, BONNIN, LEBEL et GUIEU de Paris, qui lui a fait subir un traitement spécial de purification, et qui estime les impuretés résiduelles au maximum à quelques cent millièmes.

La technique de l'expérience est la même que nous avons décrite plus haut pour l'étalonnage du pyromètre au point de fusion de l'or.

Le palier de fusion, dans le cas du platine, est moins net que dans le cas de

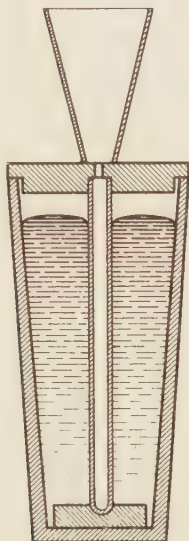


FIG. 7. — Schéma du creuset et du corps noir, utilisés au point de fusion du platine, en grandeur naturelle.

l'or ; mais, comme l'indiquent les figures 8 et 8 bis, le palier de solidification est, aux erreurs d'expérience près, extrêmement net et horizontal.

La densité du courant de haute fréquence est de 85 et de 80 ampères respectivement, pour la fusion et pour la solidification.

Avec un réglage convenable de ce courant, on peut prolonger la durée du palier de solidification autant que l'on désire ; dans nos expériences, cette durée (1 2 heure environ) était largement suffisante pour qu'on puisse faire une série de mesures avec toute la précision qu'on peut atteindre dans les cas analogues.

Résultats obtenus. — A la température de fusion du platine, les pointés pyrométriques sont faits en plaçant le verre neutre n° 2 (abaissement pyrométrique $1,9497 \cdot 10^{-4}$) devant la lampe tare. Le courant dans la lampe tare correspondant à l'égalisation des brillances est, d'après nos mesures, 292,58 mA.

Au point de fusion du platine, on a effectué quatre séries de mesures, dont les résultats sont absolument identiques. Cela est probablement un effet de hasard, étant donné que, à cette température, on peut s'attendre à des divergences de l'ordre de 0°,5 entre les moyennes.

En admettant, pour la température de fusion du platine, la valeur actuellement

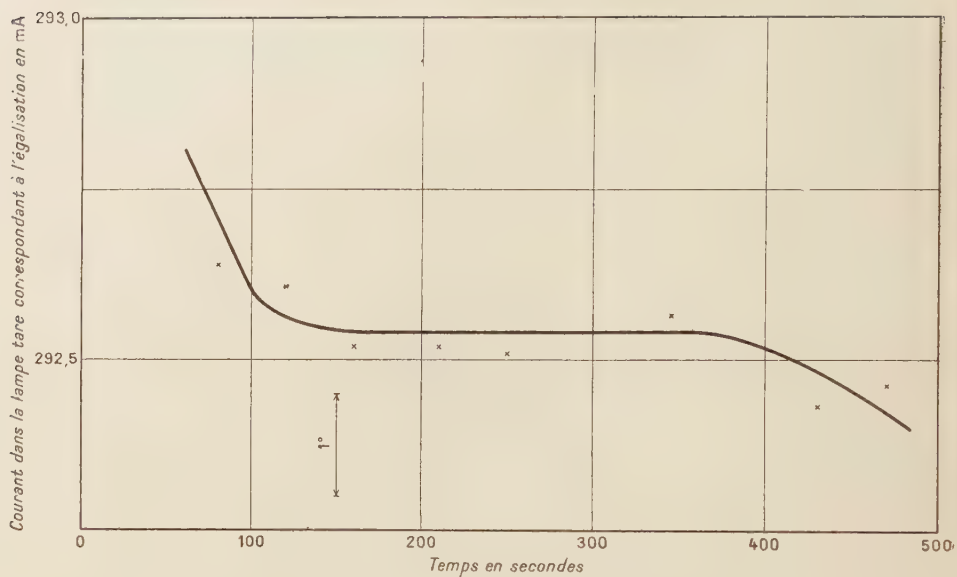


FIG. 8. — Diagramme de solidification du platine.

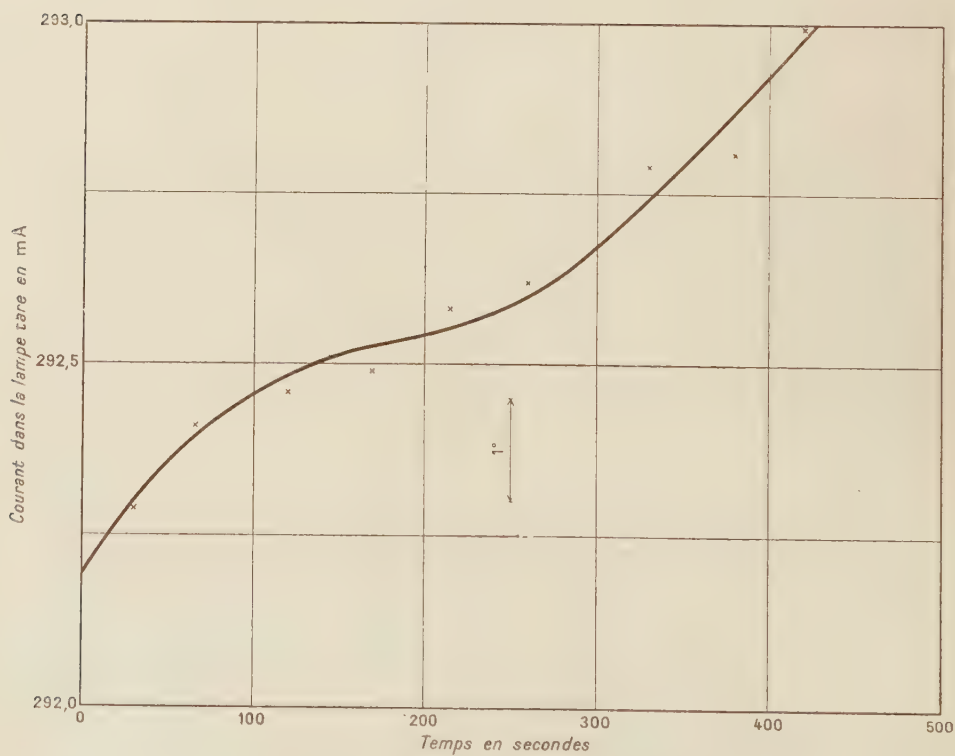
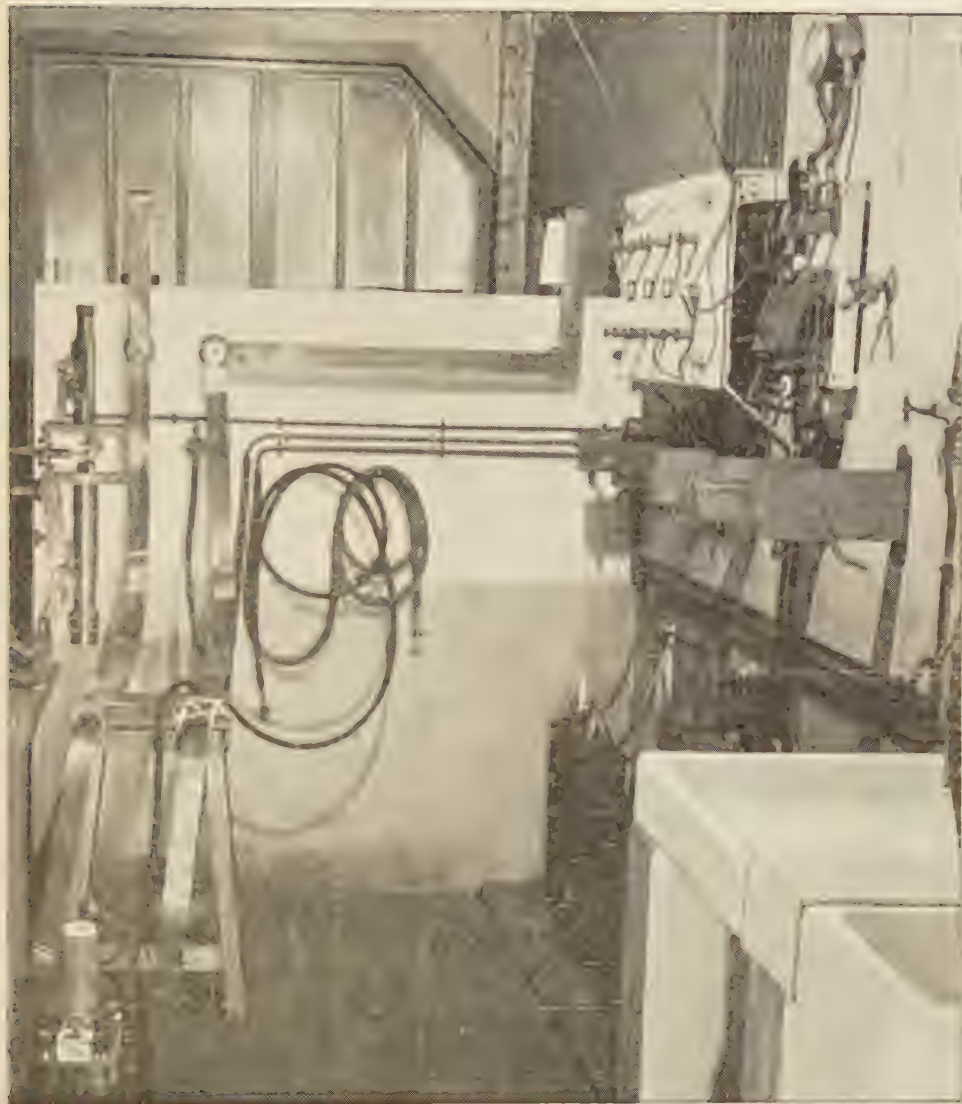


FIG. 8 bis. — Diagramme de fusion du platine.



Vue d'ensemble du montage réalisé pour la vérification
de l'étalonnage du pyromètre.

admise (2046° K), on peut calculer la température de brillance de la lampe tare, par la formule :

$$\frac{1}{S} - \frac{1}{2046} = 1.9497.10^{-4},$$

d'où : $S = 1462^{\circ},5$ K.

L'intensité du courant correspondant à cette température, d'après les mesures de J. MENDOUSSE, est de 292,70 mA. La différence entre le résultat de nos expériences et celui de MENDOUSSE n'est que de 0,12 mA sur l'intensité du courant, correspondant à 0°,4 sur la température de brillance, ce qui est l'ordre de grandeur des erreurs expérimentales.

Four à tube de carbone. — Le corps noir de référence servant aux comparaisons colorimétriques est placé à l'intérieur d'un four à tube de carbone dont nous allons décrire, dans ce qui suit, les caractéristiques.

Le tube chauffant A (figure 9), en carbone aggloméré, de longueur 80 cm, de

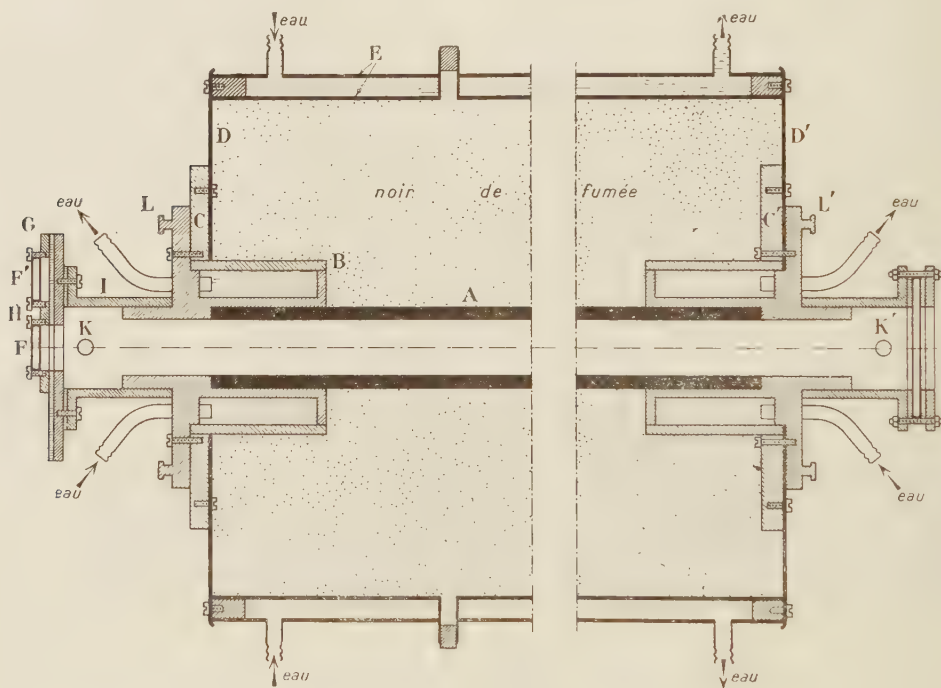


FIG. 9. — Schéma du four à tube chauffant en carbone.

diamètre extérieur 4 cm, de diamètre intérieur 3 cm, est cuivré à ses extrémités et soudé dans des garnitures métalliques B, disposées de façon à permettre une circulation d'eau de refroidissement. Sur ces garnitures sont fixées des rondelles de fibre C, C' isolantes, supportant les flasques D, D'. Ces flasques ont été choisies

en laiton très mince, de façon à assurer la libre dilatation du tube à toutes les températures. Le pourtour extérieur des flasques est vissé sur une chemise d'eau E à double enveloppe et à circulation d'eau, destinée à assurer une plus grande constance de la température du four quand la température extérieure vient à changer. Le calorifugeage du four est assuré par du noir de fumée.

Les observations se font à travers une lame de verre F, serrée sur la glissière G au moyen de vis moletées H et de rondelles de caoutchouc. Cette glissière permet la substitution à la lame de verre, si celle-ci est souillée par un dépôt de charbon, d'une autre lame propre F'. La partie fixe de la glissière est vissée sur la monture I. Un orifice K, placé tout près de F, permet de faire circuler de l'azote à l'intérieur du four, pour évacuer les fumées. Le courant électrique est amené à chaque extrémité du tube, grâce à deux bornes L, L' fixées aux garnitures B.

Le four est alimenté au courant alternatif sous 10 ou 15 volts. Ces voltages sont obtenus à l'aide d'un transformateur de 10 kilowatts de puissance, dont on branche le primaire sur le secteur de distribution électrique alternatif et dont le secondaire comporte trois bornes permettant l'obtention de 5, 10 ou 15 volts.

Le réglage de la température du four s'obtient à l'aide d'un rhéostat à fiches, intercalé dans le circuit primaire. Ce rhéostat est constitué par sept résistances, en constantan, connectées en série et dont les valeurs sont données dans le tableau ci-dessous :

0,1	ohms	supportant	80	ampères
0,2	»	»	80	»
0,25	»	»	80	»
0,71	»	»	40	»
0,71	»	»	40	»
2,0	»	»	20	»
2,0	»	»	20	»

La connexion des différentes parties du circuit est assurée par des câbles pouvant supporter 500 ampères.

Puissance consommée dans le four en fonction de la température. — Etant donné qu'un four à tube de carbone ne reste jamais comparable à lui-même, on ne peut pas fournir de chiffres exacts donnant les caractéristiques électriques d'un tel four. En effet, lorsque le tube chauffant est porté à de hautes températures, sa résistance électrique se trouve parfois très notablement diminuée et, pour atteindre dans ce four une même température, on est amené à consommer une puissance plus grande qu'au début du fonctionnement.

Néanmoins, pour avoir l'ordre de grandeur des puissances absorbées par le four à différentes températures, nous avons effectué une étude préalable de ses caractéristiques.

Le tableau ci-contre fournit les chiffres que nous avons relevés :

Température du four	Voltage aux bornes du tube	Intensité du courant	Puissance absorbée
2030°K	6,8 volts	176 ampères	1,2 kW
2100	7,3	197	1,4
2340	8,6	221	1,9
2470	8,9	247	2,2
2530	9,2	260	2,4
2640	10,0	270	2,7
2740	10,7	280	3,0
2800	11,2	286	3,2

Enceinte rayonnante. — L'enceinte rayonnante est constituée par une pièce cylindrique A (fig. 10), dans laquelle on a pratiqué deux cavités B.B' (7 mm de diamètre, 45 mm de profondeur), symétriques par rapport au plan médian de la

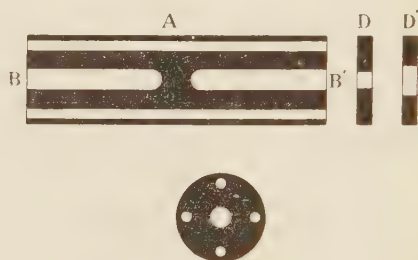


FIG. 10. — Schéma du corps noir carbone.
A : enceinte rayonnante. — D, D' : diaphragmes.

pièce A. Cette pièce est percée de quatre trous périphériques, permettant la libre circulation du courant d'azote.

Les diaphragmes D et D' possèdent des ouvertures telles que le faisceau issu de la partie centrale de l'enceinte noire couvre la glace de sortie du four.

La pièce A et les diaphragmes D, D' sont en graphite ; ils ont été travaillés au tour avec des outils en acier.

Il est évident que, pour les mesures, on ne se sert que d'une seule des cavités B, B' formant le corps noir ; l'existence du deuxième corps noir, symétrique par rapport au plan médian du four, permet une répartition symétrique de la température par rapport à ce plan ; elle permet, de plus, de retourner le four de bout en bout sans démonter l'enceinte rayonnante. Cette manœuvre présente l'avantage de prolonger la durée d'emploi du tube chauffant, qui, malgré la purification préalable de l'azote, s'use plus rapidement à l'entrée du courant d'azote qu'à sa sortie.

Mesure de la transmission de la glace de fermeture du four. — Les pointés pyrométriques, pour la mesure de la température du corps noir carbone, s'effectuant à travers la glace de fermeture du four, la connaissance de la température exacte

de celui-ci exige la mesure préalable du pouvoir de transmission de la glace. Cette mesure a été effectuée par la méthode pyrométrique ⁽¹⁾ dont nous rappellerons brièvement le principe.

On pointe le pyromètre sur une source, d'abord directement, ensuite à travers la lame de verre dont on désire mesurer le pouvoir de transmission τ .

T_1 étant la température de la source mesurée par le pointé direct, T_2 celle mesurée à travers la lame de verre, on a :

$$\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} = \frac{\lambda}{C_2} \operatorname{colog}_n \tau,$$

où λ désigne la longueur d'onde effective du verre monochromatique du pyromètre.

Si, dans les mesures ultérieures, on se sert du même pyromètre, $\frac{\lambda}{C_2} \operatorname{colog}_n \tau$ sera une constante du montage, que nous désignerons par A .

La valeur obtenue pour la constante A de notre montage est de $6,9.10^{-6} \pm 0,15.10^{-6}$.

Lampes servant d'étalons de température de couleur. — Nous avons étudié les caractéristiques de quelques types de lampes à atmosphère gazeuse.

Parmi les lampes qu'on trouve couramment dans le commerce, nous avons cherché à utiliser celles ayant un filament boudiné en forme de C. Ces lampes présentent une instabilité de régime due aux faits suivants :

1° Les supports de la grille produisent un refroidissement aux points de contact ; ce refroidissement est plus ou moins grand suivant que les supports touchent un nombre plus ou moins grand de spires. Ainsi, la variation du contact provoque une variation de la résistance du filament, qui dépasse quelquefois 1 % de la résistance.

2° Le filament ayant une forme dissymétrique, l'orientation de la lampe influe considérablement sur sa brillance. La variation provenant du changement de l'orientation de la grille était, dans le cas des lampes que nous avons étudiées, de 5 % de l'intensité lumineuse environ.

La Compagnie des Lampes a bien voulu fabriquer spécialement pour le Laboratoire des Hautes Températures des lampes à atmosphère gazeuse, à ampoules coniques. Le filament boudiné de ces lampes est disposé dans un plan vertical ; il est rectiligne aux points de contact avec les supports. De cette façon, les fluctuations du régime, du fait de la variation de la surface de contact, sont réduites au minimum (2/1000 sur l'intensité lumineuse au maximum).

Ces lampes ont une température de couleur de 2800° K environ sous 115 volts.

(1) G. RIBAUD, Mesure des températures, p. 143.

Elles ont été vieillies, avant étalonnage, pendant 24 heures à 3000° K. Une étude nous a montré que les caractéristiques de ces lampes ne subissaient pas de variations appréciables si l'on ne dépasse pas 2800° K.

Outre ces lampes à atmosphère gazeuse, nous avons étalonné deux lampes à filament de tungstène, dans le vide, de 35 watts, et une lampe à filament carbone.

CHAPITRE III.

MARCHE SUIVIE DANS LES MESURES

On commence par mettre le four carbone en marche ; la stabilisation de son régime demande environ 2 heures. Pendant ce temps, la lampe à étalonner, amenée approximativement au régime correspondant à la température de couleur du four, atteint le régime stable.

Quand la température du four est stabilisée, on fait une série de mesures au pyromètre ; on procède ensuite à l'égalisation colorimétrique entre le corps noir de référence et la lampe à étudier, en agissant sur le régime de celle-ci. On mesure l'intensité du courant et la tension aux bornes de la lampe au potentiomètre.

Nous avons fait, pour chacune des lampes et à chaque température, quatre séries de mesures en croisant les mesures de la température du four et les comparaisons de couleurs.

Résultats obtenus. — 1° La lampe carbone (L. 12) a été comparée directement au corps noir à 1900°, 2000° et 2100° K. Les chiffres obtenus expérimentalement sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Température de couleur de la lampe carbone L. 12	Intensité du courant	Tension aux bornes
1953°K	0,6203 ampères	97,73 volts
2028	0,6807	105,12
2103	0,7366	112,82

La température de couleur de la lampe carbone entre 1900° et 2100° K est donnée, en fonction de l'intensité du courant, par l'équation linéaire ⁽¹⁾ ci-dessous établie d'après les résultats fournis par l'expérience :

$$T_c = 1150,1 + 1294 I \quad (I \text{ en ampères}).$$

(1) Comme l'expérience nous l'a montré, la température de couleur de toutes les lampes varie, dans un très grand intervalle (600° dans nos expériences), en fonction linéaire de l'intensité du courant.

2° Les deux lampes à filament de tungstène dans le vide ont été étalonnées également en comparaison directe avec le corps noir de 2000° à 2360° K. Les équations (1) et (2) donnent respectivement la température de couleur des lampes $\Phi 1$ et $\Phi 2$ en fonction de l'intensité du courant :

$$(1) T_c = 952 + 4504 \quad I \quad (I \text{ en ampères}).$$

$$(2) T_c = 1010 + 4286 \quad I.$$

Le résultat des expériences effectuées sur les lampes $\Phi 1$ et $\Phi 2$ est donné dans les tableaux ci-dessous :

	Température de couleur	Intensité du courant	Tension aux bornes
$\Phi 1$	2076°K	0,2512 ampères	76,89 volts
	2310	0,3017	104,90
	2334	0,3070	107,74
$\Phi 2$	2083°K	0,2496 ampères	76,56 volts
	2111	0,2565	80,16
	2346	0,3109	110,98
	2356	0,3138	112,28

3° L'échelle de températures de couleur entre 2300° et 2800° K est portée sur les lampes à atmosphère gazeuse.

Deux de ces lampes (numérotées G_1 et G_2) ont été étalonnées par comparaison directe avec le corps noir.

Les tableaux ci-dessous donnent le résultat des mesures faites pour l'étalonnage de ces deux lampes.

	Température de couleur	Intensité du courant	Tension aux bornes
G_1	2333°K	1,970 ampères	67,54 volts
	2532	2,228	84,72
	2639	2,374	95,63
	2741	2,510	105,29
	2815	2,615	113,83
G_2	2309°K	1,936 ampères	65,07 volts
	2499	2,182	81,31
	2607	2,321	91,15
	2710	2,456	100,90
	2804	2,572	110,18

Dans les limites de températures indiquées plus haut, la température de couleur de ces lampes est une fonction linéaire de l'intensité du courant et une fonction parabolique de la tension.

La température de couleur des lampes G_1 et G_2 est donnée, respectivement, par

les équations (3) et (4) en fonction de l'intensité du courant et par les équations (5) et (6) en fonction de la tension :

$$(3) \quad T_c (G_1) = 857,5 + 750 \times I \quad (I \text{ en ampères}).$$

$$(4) \quad T_c (G_2) = 806,5 + 776 \times I \quad \text{---}$$

$$(5) \quad T_c (G_1) = 686,6 + 200,1\sqrt{V} \quad (V \text{ en volts}).$$

$$(6) \quad T_c (G_2) = 675,2 + 202,6\sqrt{V} \quad \text{---}$$

4° Nous avons étalonné, en comparaison avec les lampes G_1 et G_2 , une série de lampes à atmosphère gazeuse. Les caractéristiques de ces lampes sont très voisines de celles des lampes mentionnées ci-dessus, comme en fait état le tableau ci-après.

N° des lampes		G 7		G 8		G 9		G 10		G 11		G 12	
		I (ampères)	V (volts)	I (ampères)	V (volts)	I (ampères)	V (volts)	I (ampères)	V (volts)	I (ampères)	V (volts)	I (ampères)	V (volts)
Températures de couleur en °K	2307	1,930	64,86	1,928	64,66	1,934	65,00	1,917	64,49	1,937	65,66	1,930	65,00
	2497	2,179	81,09	2,184	81,48	2,180	81,00	2,164	80,66	2,184	80,95	2,188	81,99
	2607	2,317	91,11	2,325	91,53	2,315	90,77	2,300	90,68	2,328	92,53	2,331	92,61
	2710	2,453	100,86	2,462	101,49	2,454	100,50	2,445	101,00	2,457	101,91	2,472	102,24
	2802	2,577	110,08	2,574	110,33	2,578	110,14	2,558	110,00	2,579	111,64	2,597	112,18

Etude de la précision. — ANALYSE DES ERREURS. — Nous donnons ci-dessous la table analytique des incertitudes expérimentales maxima :

	Incertainitudes
Graduation du pyromètre dans toute son étendue.....	0°,3
Mesure de la température du corps noir carbone (corps noir de référence).	3°
Mesures colorimétriques	7°
Température de couleur de la lampe sous un régime donné.....	11°

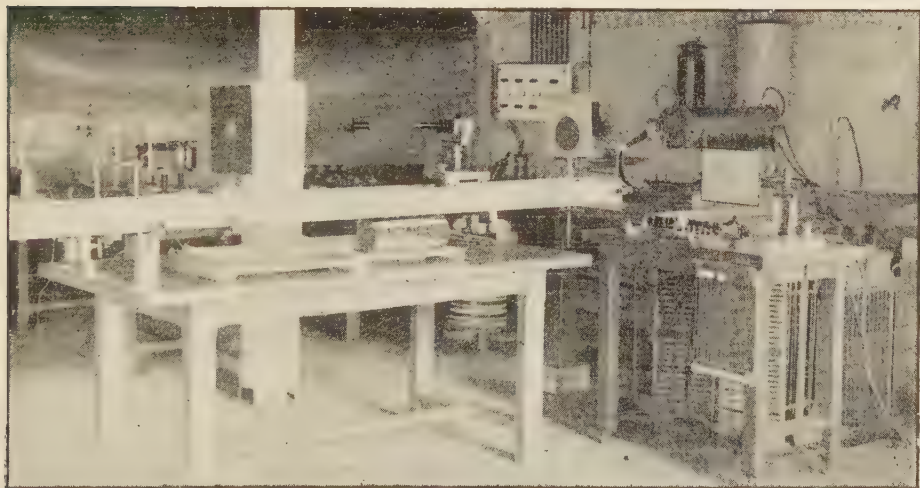
L'incertitude dans la détermination de la température du corps noir de référence provient surtout des fluctuations du secteur d'alimentation. En effet, dans nos expériences, nous avons remarqué, d'une série de mesures à l'autre, des écarts atteignant 3° (il a été rare que cette limite soit dépassée).

Il est évident que, par croisement des mesures de températures avec les comparaisons colorimétriques, l'effet de cette source d'erreurs sur le résultat des mesures a été, sinon annulé, au moins considérablement atténué.

L'incertitude principale dans l'emploi de la méthode de l'indentité de couleur réside dans les comparaisons colorimétriques.

L'écart des résultats de deux lectures successives atteint, et dépasse quelquefois, 10° . Cependant, nous n'avons jamais observé d'écarts dépassant 7° entre les moyennes de 5 pointés, de sorte qu'il est probable que la moyenne de 25 pointés est déterminée avec une incertitude inférieure à 5° .

Etude expérimentale de la précision. — Nous avons étudié, expérimentalement, la précision avec laquelle les équations d'étalonnage des lampes sont établies, en étalonnant d'autres lampes en comparaison avec les lampes G_1 et G_2 . Les comparaisons colorimétriques, dans ce cas, sont beaucoup plus précises, étant donné qu'on peut obtenir une égalité de couleur absolument parfaite. L'écart entre les résultats fournis par les deux lampes ne dépassait jamais 5° , et cela dans toute l'étendue de l'échelle de températures de couleur. On peut en conclure que la température de couleur d'une source, mesurée en comparaison avec les deux lampes mentionnées ci-dessus, peut être considérée exacte à mieux que 3° près.



Vue d'ensemble de l'installation de mesure des températures de couleur.

TROISIÈME PARTIE

EMPLOI DES CELLULES A COUCHE D'ARRÊT EN PHOTOMÉTRIE DE PRÉCISION

SOMMAIRE. — *Pour les comparaisons photométriques, nous nous sommes servi des cellules à couche d'arrêt. La méthode photométrique employée est la méthode de zéro où la cellule n'intervient que comme indicateur d'égalité de deux éclairagements.*

L'emploi des cellules à couche d'arrêt, en photométrie, exige que l'on prenne certaines précautions. Par conséquent, l'étude des caractéristiques de chaque cellule s'impose.

Nous avons fait une étude complète des caractéristiques des cellules que nous avons utilisées dans nos mesures. L'étude a été faite, en particulier, pour les éclairagements faibles (inférieurs à 50 lux).

On a étudié principalement la distribution spectrale de la sensibilité des cellules au sélénium et on a adapté un filtre liquide en vue de ramener la cellule à avoir la même sensibilité spectrale que l'œil humain. Le résultat obtenu est satisfaisant. En effet, la cellule, munie du filtre, permet la comparaison des sources de températures de couleur très différentes avec une précision de l'ordre de 1/200.

CHAPITRE I.

I. — Généralités.

La transformation directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique au moyen des cellules à couche d'arrêt ⁽¹⁾ a été observée, pour la première fois ⁽²⁾, par GEIGER [1] en 1926. L'expérience était faite sur un redresseur à oxydure de cuivre.

(1) On sait que le nom de « Couche d'arrêt » (Sperrschicht), donné par les Allemands, rappelle une théorie de SCHOTTKY [5] sur le fonctionnement de ces cellules comme redresseurs des courants alternatifs. A la session de 1935 du C. I. E., on a proposé les dénominations : Pile à couche d'arrêt, Cellule à contact rectifiant, Pile photoélectrique à couche d'arrêt, etc. Il semble que le nom « Photopile à contact rectifiant » conviendrait bien pour l'appellation de ces appareils. Néanmoins, le C. I. E. n'ayant pris aucune décision en ce qui concerne la dénomination de ces cellules, nous emploierons le nom original, qui est le plus courant.

(2) Le phénomène a été observé, antérieurement, par d'autres expérimentateurs, mais sans avoir été énoncé de façon précise (voir la bibliographie [6]-[7]).

Celui-ci était constitué par une plaque de cuivre qui était couverte d'une mince couche d'oxyde cuivreux naissant et sur laquelle on avait pressé une spirale en cuivre formant la contre électrode.

L'observation de l'auteur n'ayant donné lieu ni à une publication scientifique, ni à des applications pratiques, semble être passée inaperçue.

Vers 1930, plusieurs auteurs redécouvrirent simultanément le phénomène [2]-[3]-[4].

LANGE [2] publia, le premier, un travail concernant l'obtention de courants relativement élevés, à l'aide des cellules à oxydure de cuivre soumises à l'action de la lumière.

La cellule décrite par LANGE est identique à celle de GEIGER, avec cette différence que l'électrode en spirale de cuivre est remplacée par une électrode transparente. Une telle cellule étant éclairée débite un courant de l'ordre de 100μ A par lumen, lorsque ses électrodes sont reliées à l'aide d'un galvanomètre de faible résistance.

Dans les applications photométriques, ces cellules ont été remplacées, de plus en plus, par les cellules au sélénium. Ces dernières ont une sensibilité beaucoup plus grande que les cellules à oxyde de cuivre et, de plus, leur sensibilité spectrale se rapproche davantage de celle de l'œil humain.

Nous ne pouvons pas fournir de renseignements concernant la fabrication commerciale de ces cellules : nous donnons seulement, en quelques lignes, le principe de cette fabrication (BERGMANN [8], LANGE [9]).

Ces cellules s'obtiennent en appliquant sur un support en fer une couche mince de sélénium. Sur celui-ci est pulvérisée ensuite une couche transparente de plomb ou d'étain formant la contre électrode. La contre électrode est constituée quelquefois par l'argent, l'or ou le carbone (1).

La pulvérisation de la contre électrode s'effectue par évaporation du métal sous un vide très poussé, ou par la méthode habituelle de pulvérisation cathodique. Dans ce dernier cas, afin d'assurer la transparence de la contre électrode, le métal à pulvériser est pris sous forme de grille.

II. — Action primaire de la lumière.

Relation Courant-Flux lumineux. — Il a été établi par AUWERS et KERSCHBAUM [10] et par SCHOTTKY [11] que l'action primaire de la lumière sur les cellules à couche d'arrêt est, non pas la formation d'une force électromotrice, mais la libération des photoélectrons. En effet, l'expérience montre que le cou-

(1) Procédé breveté par la Société Rhône Poulenc. Les cellules où la contre électrode est formée par le carbone sont particulièrement sensibles à l'ultraviolet.

rant de court-circuit de ces cellules varie linéairement ⁽¹⁾ avec le flux lumineux, tandis qu'il n'en est pas de même de la force électromotrice, que l'on mesure à l'aide d'un électromètre ou par la méthode d'opposition.

Le courant débité par une cellule à couche d'arrêt n'est une fonction linéaire de l'éclairement que dans le cas où la résistance du circuit extérieur est négligeable vis-à-vis de celle de la cellule. Les auteurs cités plus haut expliquent le phénomène en admettant que les photoélectrons, libérés sous l'action de la lumière, traversant, par suite de l'énergie cinétique acquise, la couche de barrage, retournent à la matière d'où ils ont été extraits, par deux chemins différents : d'une part par le circuit extérieur, d'autre part par des circuits intérieurs qu'ils forment en retraversant la couche d'arrêt dans le sens du passage facile. Le fait qu'ils choisissent l'un ou l'autre chemin dépend de la grandeur de la résistance du circuit extérieur. Par conséquent, dans le cas où cette résistance serait nulle ou très faible, elle serait traversée par tous les électrons libérés dont le nombre est rigoureusement proportionnel à l'intensité d'éclairement de la cellule ⁽²⁾.

Nous ne discuterons pas ici les différentes théories sur le fonctionnement des cellules à couche d'arrêt, ce qui est en dehors de notre sujet. On trouvera dans la bibliographie ([12]-[13]-[14]-[15]-[16]) les références de certains ouvrages dans lesquels les auteurs ont réuni les différentes hypothèses sur le sujet.

III. — Variation de la force électro-motrice avec l'éclairement.

Comme il a été mentionné plus haut, la f. é. m. mesurée aux bornes d'une cellule ne varie pas en fonction linéaire de l'éclairement. Cette f. é. m. croît, avec l'éclairement, d'abord comme le courant du court-circuit, puis de moins en moins vite. Dans le cas des cellules au sélénium, la f. é. m. semble atteindre une limite pour un éclairement de l'ordre de 3000 lux environ.

Dans nos expériences, qui avaient comme but principal l'emploi des cellules à couche d'arrêt dans la photométrie des lampes étalons, l'éclairement ne dépassait pas 30 lux. Pour les éclairéments de cet ordre, la f. é. m. varie presque linéairement avec l'éclairement, comme en fait état la courbe représentée sur la figure 1.

L'ordre de grandeur de la f. é. m. engendrée par un même éclairement varie d'une cellule à l'autre, beaucoup plus que celui du courant de court-circuit. Voici, par exemple, la différence des sensibilités des cellules R. 2 et S. 41, d'une part

(1) Des écarts avec la loi de proportionnalité ont été observés. Mais il est probable que ces écarts ont leur origine dans le déplacement de la courbe de sensibilité spectrale avec l'éclairement.

(2) L'hypothèse des auteurs cités plus haut ne se montre valable que pour les éclairéments faibles; toutefois, il ne semble pas aisé d'expliquer les faits par d'autres hypothèses qui soient compatibles avec l'existence d'une couche de barrage et l'hypothèse d'émission de photo-électrons par le semi-conducteur.

dans le cas où l'on mesure le courant de court-circuit, d'autre part dans le cas où l'on mesure la f. é. m.

N° de la cellule	Eclairement en lux	Courant de court- circuit	f. é. m.
R. 2 (Rhône Poulenc).....	12,5	2,90 μ A	2,7 mV
S. 41 (Tungsram)	»	5,16 μ A	20,14 mV



FIG. 1.

IV. — Variation de la force électro-motrice avec la température ⁽¹⁾.

Nous n'avons étudié l'influence de la chaleur sur la sensibilité des cellules à couche d'arrêt que dans la limite des variations de la température ambiante.

La f. é. m. aux bornes de ces cellules subit une diminution notable lorsqu'on élève leur température.

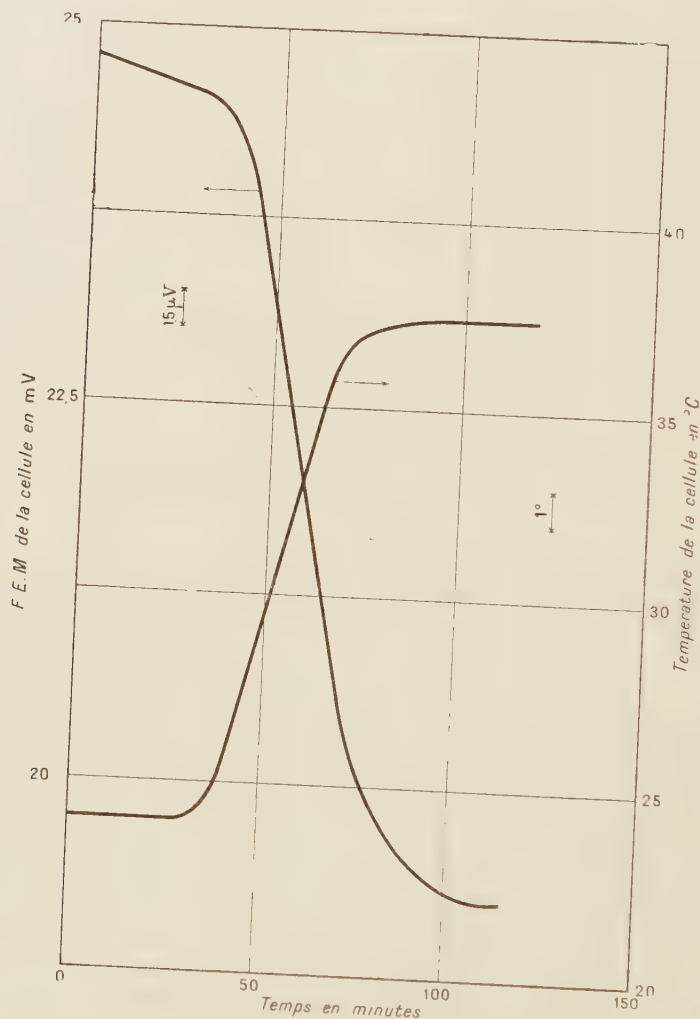


FIG. 2.

(1) D'après plusieurs expérimentateurs, la sensibilité spectrale des cellules subit un déplacement sous l'effet de la chaleur [17]. Pour les cellules au sélénium, le maximum de la courbe de sensibilité spectrale se déplace vers le rouge quand la température s'élève. De plus, c'est dans la région rouge du spectre que la sensibilité de ces cellules est la moins stable [18].

Le graphique 2 donne, en fonction du temps, d'une part la variation de la température, d'autre part la variation de la f. é. m. de la cellule. On y voit qu'une augmentation de 10° de la température de la cellule produit une diminution de l'ordre de 2 mV de la f. é. m.

Cette diminution de la sensibilité globale de la cellule est en partie temporaire et en partie permanente. En effet, lorsqu'on ramène la cellule à sa température initiale après l'avoir portée à une température plus élevée, la f. é. m. engendrée par le même éclairement est inférieure à celle observée avant l'élévation de la température.

V. — Variation de la force électro-motrice avec la durée de l'éclairement.

La f. é. m. d'une cellule au sélénium, soumise à un éclairement constant, n'atteint pas immédiatement, après l'exposition, sa valeur de régime. Cette f. é. m. subit une diminution en fonction de la durée de l'éclairement, d'abord rapidement,

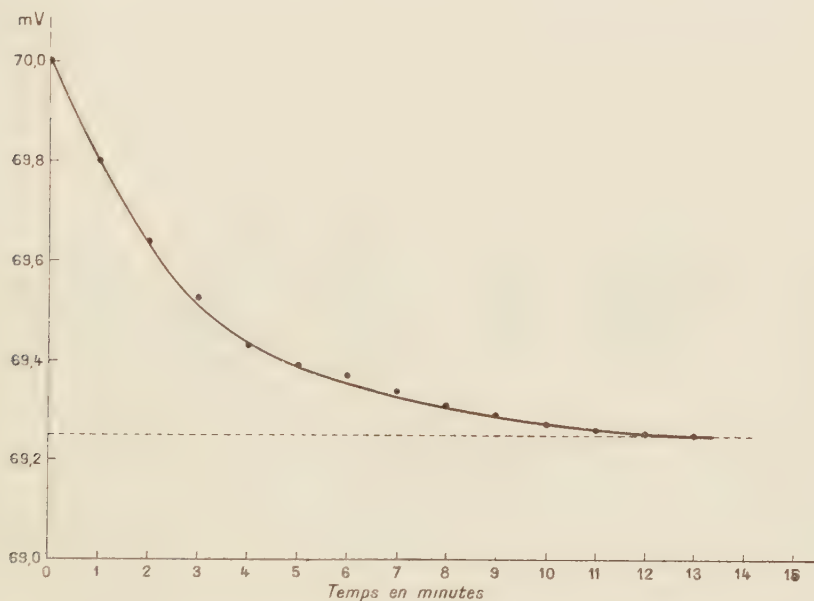


FIG. 3. — Diminution de la force électromotrice de la cellule avec la durée de l'éclairement (cellule S. 41 ; éclairement = 36 lux). Une variation de 0,4 mV de la force électromotrice correspond à une variation de 1 % de l'éclairement.

ensuite de moins en moins vite, et elle atteint sa valeur de régime au bout d'une dizaine de minutes environ.

L'importance de l'écart de la f. é. m. de régime avec la f. é. m. initiale est en

général différente d'une cellule à l'autre. Cet écart (en pour cent) est en général d'autant plus élevé que l'éclairement est plus fort (1).

Dans le cas des cellules que nous avons utilisées et pour les éclairagements de l'ordre de 25 lux, l'écart atteint 2 %. La figure 3 représente l'allure de la décroissance de la f. é. m. en fonction du temps. On y voit que le régime stable est atteint au bout de 13 minutes.

Remarque : L'importance du phénomène de fatigue varie considérablement d'une cellule à l'autre. Une sélection de ces appareils est nécessaire, surtout dans les cas où on les utilise comme mesureurs directs des grandeurs photométriques.

VI. — Influence de la durée d'interruption de l'éclairement.

Lorsqu'on effectue, par la méthode de substitution, des comparaisons photométriques à l'aide d'une cellule, celle-ci se trouve plongée dans l'obscurité pendant le temps nécessaire à la substitution des deux lampes à comparer.

Nous avons étudié l'effet de la durée de ce temps sur la sensibilisation de la cellule de la façon suivante.

La cellule a été soumise à un éclairage constant, de 30 lux environ, pendant

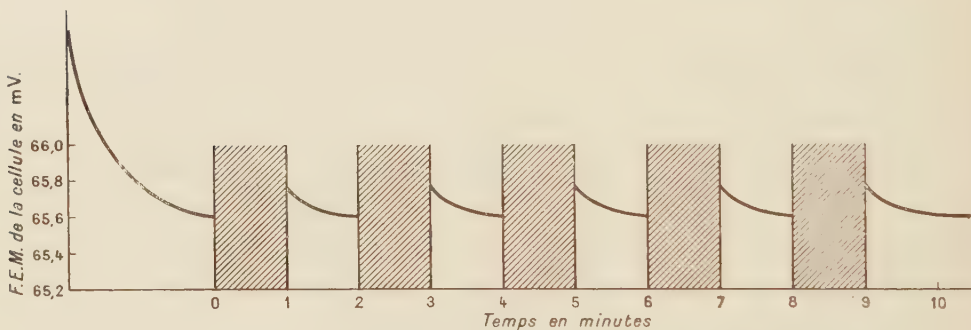


FIG. 4. — Les zones hachurées correspondent aux temps pendant lesquels la cellule est plongée dans l'obscurité.

15 minutes. A partir de ce moment, la cellule, ayant atteint son régime stable, a été plongée dans l'obscurité pendant 1 minute ; ensuite, elle a été éclairée pendant 1 minute, puis elle a été plongée de nouveau dans l'obscurité pendant 1 minute.

Un tel cycle a été reproduit plusieurs fois.

Pendant les intervalles où la cellule était éclairée, on procédait à la mesure de la f. é. m. aux bornes. La figure 4 représente le résultat de cette expérience.

(1) Certaines cellules représentent une sensibilisation, c'est-à-dire une augmentation de la f. é. m., avec la durée de l'éclairement, dans le cas des éclairagements faibles. Nous avons remarqué l'existence de ce cas pour la cellule R. 1. ; la sensibilisation ne se produit que pour les éclairagements inférieurs à 2 lux.

On constate que pour 1 minute de la durée d'obscurité, la sensibilisation de la cellule n'atteint que 0,3 % et que, au bout de 1 minute, le régime stable est atteint.

VII. — Influence de l'effet rectifiant sur le débit de la cellule pour les débits très faibles de part et d'autre de l'équilibre.

Lorsque, dans les mesures photométriques, on équilibre la f. é. m. aux bornes de la cellule au moyen d'un potentiomètre à déviation, le galvanomètre de mesure se trouve, en général, soumis à de faibles tensions dans les deux sens. Dans ce cas, par suite de l'effet rectifiant de la cellule, on peut se demander si la sensibilité du montage est la même de part et d'autre de l'équilibre électrique.

L'équilibre étant réalisé pour un éclairement de la cellule que l'on a choisi comme unité, voici les déviations du galvanomètre pour différentes valeurs de l'éclairement :

Eclairements	Déviations en millimètres
0,2216	— 127
0,9365	— 103
0,9518	— 79
0,9675	— 51
0,9835	— 27
1	0
1,017	+ 30
1,035	+ 64
1,052	+ 93
1,070	+ 127
1,090	+ 156

Comme on le voit, la différence de la sensibilité du montage de part et d'autre de l'équilibre est relativement grande. Les mesures de haute précision nécessitent l'étalonnage du galvanomètre pour les déviations positives et pour les déviations négatives.

Remarque : La sensibilité du montage restant pratiquement la même dans de très grandes limites d'éclairement de la cellule, il est évident que l'importance de la différence de la sensibilité de part et d'autre de l'équilibre est d'autant moins grande que l'éclairement de la cellule est plus élevé. Les chiffres donnés plus haut sont relatifs à un éclairement de 20 lux environ.

VIII. — Inertie lumineuse de la cellule.

Lorsqu'on cesse d'éclairer la cellule, la f. é. m. aux bornes de celle-ci ne s'annule pas immédiatement. La table ci-dessous donne une idée de l'ordre de grandeur de l'effet.

	Temps en secondes	Après l'interruption de l'éclairement						
		0	30	60	90	120	150	180
Eclairement : 12 lux. Temps d'exposition : 1 minute. Force électro-motrice aux bornes : 20 mV environ	Différence de potentiel en μV	40	20	11	9	7	5	4
Eclairement : 12 lux. Temps d'exposition : 5 minutes Force électro-motrice aux bornes 20 mV environ	<i>Idem</i>	60	20	13	10	7	6	5
Eclairement : 36 lux Force électro-motrice 59 mV.	<i>Idem</i>	70	20	10	8	6	5	4

Comme on le voit, l'ordre de grandeur de la différence de potentiel, due à l'effet de l'inertie de la cellule, est presque indépendant de l'éclairement, au moins dans une certaine limite.

L'effet de l'inertie s'observe pour toutes les valeurs de l'éclairement, même pour des éclairagements très faibles auxquels la cellule se trouve exposée lorsqu'on l'éclaire à l'aide des bandes spectrales fournies par un monochromateur.

Le phénomène de l'inertie peut avoir un certain effet dans le résultat des mesures lorsqu'on désire employer des secteurs tournants. Nous discuterons plus loin la possibilité d'emploi de ces secteurs en combinaison avec les cellules à couche d'arrêt.

Il faut tenir compte de l'inertie de la cellule, surtout dans les applications spectrophométriques. Par exemple, lorsqu'on désire déterminer la transmission spectrale d'un verre en se servant d'une cellule, on éclaire celle-ci à l'aide de la bande spectrale désirée, d'abord directement, ensuite en interposant le verre à étudier sur le trajet du faisceau lumineux. Le rapport des déviations du galvanomètre de mesure donne la transmission spectrale du verre. Or, si la deuxième lecture est faite avant la disparition de l'effet de l'inertie, le résultat de la mesure peut être fortement erroné.

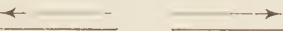
IX. — Sensibilité à l'infrarouge.

Nous n'avons pas effectué de mesures spéciales pour étudier l'ordre de grandeur de la sensibilité des cellules aux rayons infrarouges. Nous avons étudié seulement l'effet de cette sensibilité, si elle existe, sur le résultat des mesures dans la comparaison des lampes.

On sait que les lampes à filament de tungstène et celles à filament de carbone, portées à la même température de couleur, présentent une différence notable dans le rayonnement infrarouge. Nous avons effectué des comparaisons photométriques, d'abord en éclairant la cellule directement et, ensuite, en interposant sur le trajet du faisceau des lampes une cuve de 2 cm d'épaisseur, contenant une solution diluée de sulfate de cuivre qui absorbe parfaitement le rayonnement infrarouge. Le résultat des mesures n'a subi aucune modification sensible, ce qui montre que la sensibilité, dans la région infrarouge du spectre, est, sinon nulle, au moins très petite.

X. — Sensibilité locale.

La sensibilité de la cellule varie d'un point à l'autre de la surface sensible. Voici, à titre d'exemple, les déviations du galvanomètre, lorsqu'on éclaire, à l'aide du même flux, différentes régions de la cellule (Le point 0 indique le centre de la cellule) :

														
Distances au centre en millimètres	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Indications du spot en millimètres	394	388	398	400	408	421	424	429	433	424	413	410	424	442

XI. — Sensibilité spectrale.

La sensibilité des cellules à couche d'arrêt n'est pas la même pour toutes les longueurs d'onde. La sensibilité spectrale de ces cellules, tout en étant notablement différente de celle de l'œil humain, s'en rapproche cependant beaucoup plus que celle de toutes les autres cellules photoélectriques actuellement en usage.

L'allure de la courbe de sensibilité spectrale d'une cellule dépend, naturellement, des matériaux utilisés pour sa fabrication. De plus, elle dépend des traitements que l'on a fait subir à la cellule. Toutefois, la sensibilité des cellules au sélénium est une fonction relativement simple de la longueur d'onde ne présentant qu'un seul maximum dans le spectre visible. Ce maximum est situé entre 5600 et 6000 Å.

Détermination de la sensibilité spectrale.

XII. — Méthode employée.

La sensibilité spectrale est définie, en principe, par la fonction $K_\lambda = \frac{i_\lambda}{E_\lambda}$ où i_λ est le courant débité par la cellule et E_λ l'éclairement énergétique produit par la lumière monochromatique incidente.

Nous avons déterminé les valeurs de K_λ en éclairant la cellule à étudier à l'aide

des bandes spectrales fournies par un monochromateur étalonné et une lampe à ruban de tungstène de température de couleur déterminée.

Soient :

b_λ la brillance spectrale relative de la lampe à ruban de tungstène portée à la température de couleur T_c , pour la longueur d'onde λ ;

τ_λ la transmission du monochromateur pour la même longueur d'onde ;

$\Delta\lambda$ la largeur de la bande spectrale transmise ;

d_λ la déviation du galvanomètre de mesure pour le courant i_λ .

On a :

$$K_\lambda = \frac{i_\lambda}{E_\lambda} = C \frac{d_\lambda}{b_\lambda \tau_\lambda \Delta\lambda} .$$

C étant une constante indépendante de la longueur d'onde n'intervient pas dans le résultat final. On peut poser $C = 1$. Dès lors, on a :

$$K_\lambda = \frac{d_\lambda}{b_\lambda \tau_\lambda \Delta\lambda} .$$

Nous allons développer, dans ce qui suit, la façon dont les grandeurs qui interviennent dans le calcul de K_λ ont été déterminées.

XIII. — Lampe à ruban de tungstène. Mesure de sa température de couleur.

La lampe utilisée est une lampe à ruban horizontal et à atmosphère gazeuse. Sa température de couleur sous 12 V et 16,4 A est de 2800° K. A cette température, l'usure de la lampe est imperceptible. En effet, ces lampes n'évoluent que très lentement, même dans le cas où leur température de brillance est de 2700° K. Or, sous le régime où nous l'avons utilisée, sa température de brillance est de 2500° K seulement.

La température de couleur de la lampe a été mesurée, d'une part en la comparant par la méthode de l'identité de couleur aux lampes étalonnées en températures de couleur, d'autre part par la mesure directe de sa température de brillance [19]

Les deux résultats présentaient un écart de 15°. La méthode de l'identité de couleur étant la méthode la plus sûre et directe, c'est la valeur fournie par cette méthode que nous avons admise par la suite.

XIV. — Description du monochromateur.

L'appareil utilisé est le monochromateur double de VAN CITTERT. Il a été construit à Utrecht en vue de mesures physiques du rayonnement visible. Il comprend deux monochromateurs disposés symétriquement par rapport à une fente commune, fente médiane F_3 (fig. 5).

Dans nos mesures de sensibilité spectrale, nous ne nous sommes servi que d'un

seul des monochromateurs, le deuxième ayant été utilisé pour la détermination de la transmission spectrale du premier.

Chacun des monochromateurs est composé d'un prisme P et de deux lentilles corrigées L et L' . Pour la mise au point, les deux lentilles se déplacent à l'aide d'un tambour T . Deux lentilles plan-convexes L_3 et L'_3 , fixées de part et d'autre

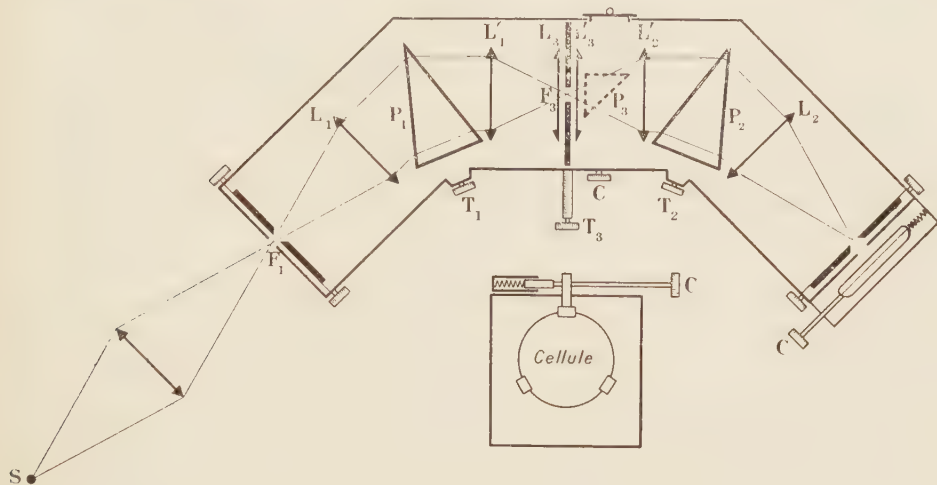


FIG. 5. — Schéma du monochromateur et du montage utilisé.

de la fente F_3 , servent à concentrer sur la lentille L'_2 la lumière transmise par le premier monochromateur.

Le déplacement de la fente médiane F_3 , dans le plan du spectre, s'effectue à l'aide du tambour T_3 .

L'appareil comprend un prisme à réflexion totale P_3 placé derrière la lentille L'_3 et servant aux réglages. Pour les mesures, on escamote ce prisme.

Afin de pouvoir éclairer toujours la même région de la cellule, on a muni l'appareil de deux dispositifs (C , C') à vis micrométrique. Ces dispositifs sont placés derrière les fentes F_3 et F_2 .

XV. — Réglage du monochromateur.

Le réglage de l'appareil s'effectue de la façon suivante :

1° On éclaire (après avoir rabattu le prisme à réflexion totale P_3) le prisme P_1 , à l'aide d'un tube à hélium. On amène ce prisme au minimum de déviation pour la raie jaune de l'hélium.

2° On agit sur l'éloignement des lentilles L_1 et L'_1 , de façon à observer en F_1 , à l'aide d'un microscope, une image nette de la fente F_3 . On repère l'indication du tambour T_1 .

3° On transporte le tube à hélium devant F_1 . On relève le prisme P_3 . On supprime la fente F_3 . On agit sur l'orientation du prisme P_2 et sur l'ajustement des lentilles L_2 et L'_2 jusqu'à obtention, sur la fente F_2 , de l'image de la fente F_1 . Lorsque cette image ne présente aucune irisation sur les bords, le deuxième monochromateur est devenu rigoureusement symétrique du premier. On note alors l'indication du tambour T_2 .

XVI. — Etalonnage du monochromateur.

L'étalonnage du monochromateur comporte :

- 1° détermination de la courbe de dispersion ;
- 2° détermination, pour une même largeur de fente Δn , de la largeur spectrale $\Delta\lambda$ transmise par l'appareil ;
- 3° détermination de la transmission spectrale.

XVII. — Dispersion.

La détermination de la dispersion du monochromateur a été faite en éclairant la fente F_1 à l'aide du tube à hélium et en notant pour chaque raie apparaissant derrière la fente F_2 l'indication du tambour T_3 .

La table ci-dessous reproduit les indications que nous avons relevées pour différentes longueurs d'onde. La courbe de la dispersion est donnée sur la figure 6.

	Longueurs d'onde	T_3
	—	—
	4388 Å	24,40
	4472	23,52
	4713	21,45
Tube à hélium	4922	19,90
	5016	19,30
	5876	15,35
	6678	13,07
	7065	12,34
	4358	25,15
Arc au mercure	5461	17,00
	5770	15,80

XVIII. — Largeur relative de la bande spectrale $\Delta\lambda$ transmise.

Pour le calcul de la sensibilité spectrale de la cellule, ce sont les valeurs relatives de $\Delta\lambda$ qui interviennent. Ces valeurs ont été déterminées graphiquement en se servant de la courbe de dispersion de l'appareil. La courbe donnant $\Delta\lambda$ en fonction de λ est donnée sur la figure 6.

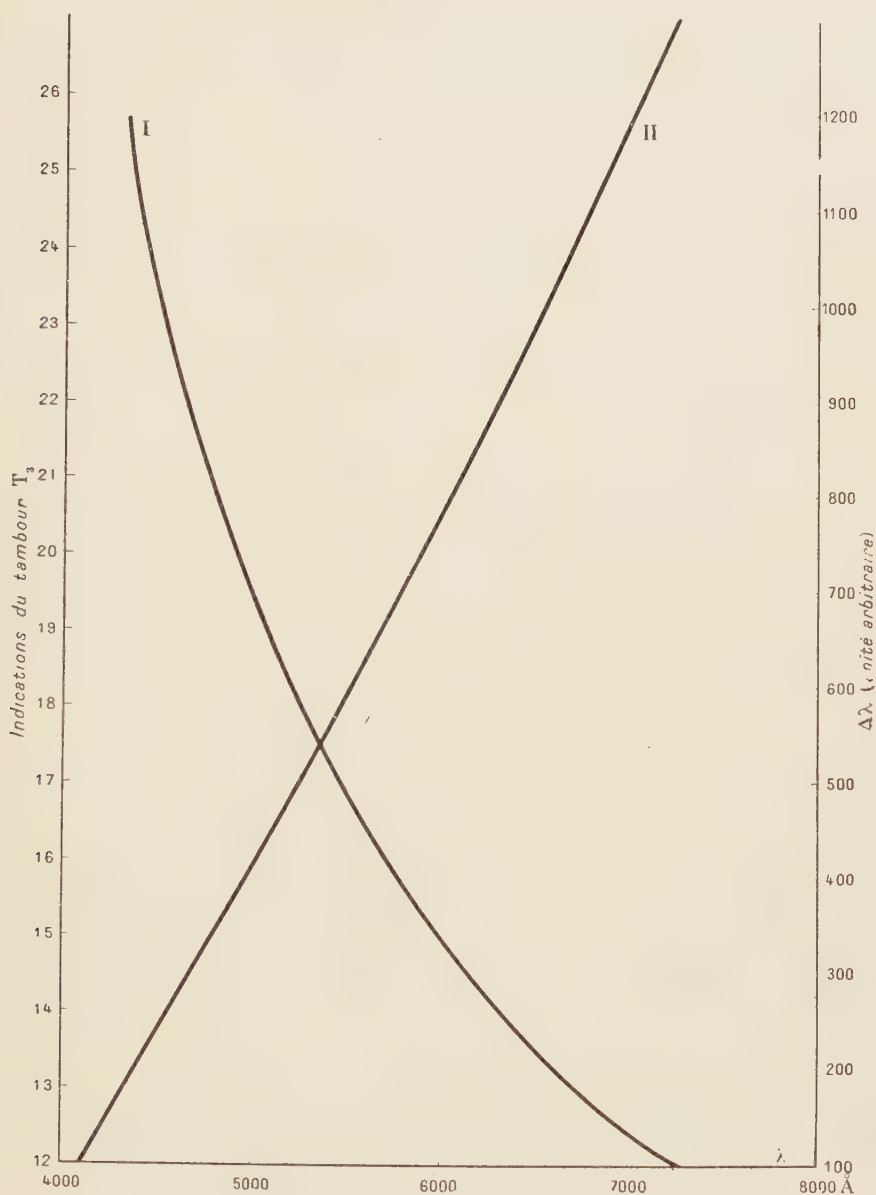


FIG. 6. — I Courbe de la dispersion.
II Courbe donnant $\Delta\lambda$ en fonction de λ .

XIX. — Transmission spectrale.

La détermination de la transmission spectrale a été faite par la méthode suivante.

La fente F_1 (figure 5) étant éclairée à l'aide d'une lampe à ruban de tungstène ou d'un arc au mercure :

1° On enlève la lentille L'_3 ; on place la cellule derrière la fente F_3 . On note la déviation d_1 du galvanomètre. Cette déviation d_1 étant proportionnelle au courant débité par la cellule, on a :

$$d_1 = K_\lambda E_\lambda,$$

où K_λ est la sensibilité spectrale de la cellule et E_λ l'intensité du flux que celle-ci reçoit.

2° On transporte la cellule derrière la fente F_2 . On replace la lentille L'_3 . On note la déviation d_2 du galvanomètre. τ_λ étant la transmission spectrale de l'appareil, on a :

$$d_2 = K_\lambda E_\lambda \tau_\lambda,$$

d'où l'on déduit :

$$\frac{d_2}{d_1} = \tau_\lambda.$$

Les valeurs de τ_λ déterminées pour différentes longueurs d'onde permettent de tracer la courbe (λ, τ_λ) .

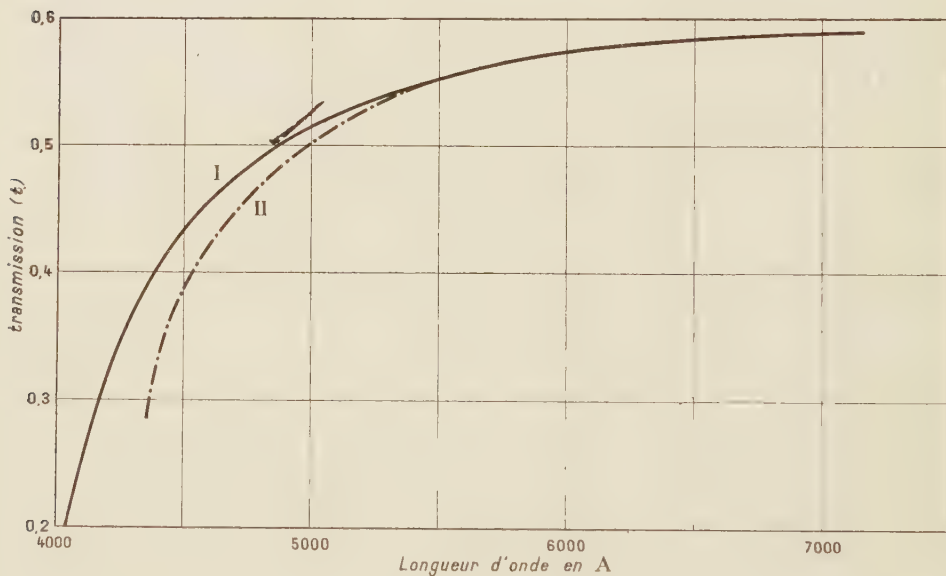


FIG. 7. — Courbe de la transmission du monochromateur tracée :
(I) en se servant des raies de l'arc au mercure ;
(II) en se servant des bandes spectrales fournies par une lampe à ruban de tungstène.

Cette courbe, obtenue en se servant des raies d'un arc au mercure, est donnée sur la figure 7.

On a reproduit en pointillé, sur la même figure, la courbe de transmission spec-

trale obtenue en se servant d'une lampe à ruban de tungstène. Comme on le voit, il existe un écart systématique entre les valeurs de τ_λ mesurées, d'une part en se servant de l'arc au mercure, d'autre part en se servant de la lampe à ruban de tungstène.

Cet écart tient au fait que l'influence de la lumière parasite sur le résultat des mesures est beaucoup moins importante dans le cas où l'on se sert d'un arc au mercure que dans celui où l'on utilise une source incandescente.

En effet, la lumière transmise par le premier monochromateur contient, en plus de la lumière de la longueur d'onde transmise, une certaine quantité de lumière parasite provenant, par suite de la diffusion sur les surfaces optiques, d'autres régions du spectre. Cette lumière parasite étant dispersée par le deuxième monochromateur, la lumière transmise par ce dernier est presque parfaitement purifiée. Par conséquent, la cellule se trouvant derrière le premier monochromateur est éclairée, en plus de la lumière de la longueur d'onde désirée, par la lumière parasite, tandis que, lorsqu'on la place derrière le deuxième monochromateur, elle n'est éclairée que par la lumière de la bande spectrale.

Or, dans le cas où l'on opère à l'aide d'une source à spectre continu, la brillance spectrale de celle-ci, décroissant rapidement lorsque la longueur d'onde diminue, l'intensité du flux monochromatique tombant sur la cellule devient de plus en plus faible à mesure qu'on se déplace vers les courtes longueurs d'onde ; dans cette région du spectre, le courant débité par la cellule sous l'action du flux monochromatique est de même ordre que celui débité sous l'action de la lumière parasite. De cette façon, l'erreur commise dans l'évaluation de τ_λ atteint 100 % aux extrémités du spectre.

Lorsqu'on opère à l'aide d'une source à spectre de raies, l'intensité des raies étant dans toutes les régions du spectre suffisamment grande, l'influence de la lumière parasite sur le résultat des mesures devient négligeable.

Voici, à titre l'exemple, les déplacements du spot, d'une part pour les raies de l'arc au mercure, d'autre part pour les bandes spectrales de la lampe à ruban de tungstène.

Longueurs d'onde	Déplacements du spot	
	Arc au mercure	Lampe à ruban de tungstène $T_C = 2800^\circ \text{K}$
4358 Å	129 mm	4 mm
5461	318	190
5770	390	295

XX. — Résultats obtenus.

Le monochromateur étant étalonné, on a déterminé la sensibilité spectrale des cellules R.2 et S.41 par la méthode exposée au début du chapitre. Le résultat

des expériences et les grandeurs qui entrent dans le calcul de la sensibilité spectrale sont donnés dans la table ci-dessous :

λ en $m\mu$	b_λ	τ_λ	$\Delta\lambda$	d_λ en mm		$K_\lambda : K_{560}$	
				Cellule R. 2	Cellule S. 41	Cellule R. 2	Cellule S. 41
400	13,82	—	—	—	—	—	—
420	19,94	0,318	1,34	2	3	0,37	0,50
440	27,52	0,405	2,04	11	12	0,76	0,74
460	36,55	0,456	2,74	25	27,5	0,86	0,85
480	47,03	0,490	3,44	45	50	0,896	0,89
500	58,78	0,515	4,15	76	84	0,942	0,944
520	71,64	0,534	4,85	115	127	0,972	0,964
540	85,45	0,547	5,58	166	181	0,998	0,980
560	100,00	0,558	6,32	225	250	1,000	1,000
580	115,1	0,567	7,09	285	315	0,966	0,960
600	130,4	0,575	7,87	334	381	0,888	0,912
620	145,8	0,578	8,65	345	395	0,742	0,764
640	161,1	0,580	9,46	295	319	0,524	0,508
660	176,1	0,584	10,3	171	210	0,252	0,280
680	190,5	0,588	11,2	79	112	0,099	0,124
700	204,4	0,588	12,0	45	58	0,049	0,056
720	217,7	0,588	13,0	28	28	0,026	0,024

On a donné sur la figure 8 les courbes de sensibilité spectrale relatives aux cellules mentionnées ci-dessus ; on voit que ces deux cellules, tout en étant de provenances différentes, ne présentent pas de grands écarts en ce qui concerne la sensibilité spectrale.

XXI. — Adaptation des filtres.

Les cellules au sélénium étant, parmi les cellules photoélectriques, celles dont la sensibilité spectrale se rapproche le plus de celle de l'œil humain, il est relativement facile de mettre au point des filtres correcteurs de façon à amener la courbe de sensibilité spectrale de ces cellules, avec suffisamment de précision, en coïncidence avec celle de l'œil.

Nous avons utilisé, à cet effet, un filtre liquide de 2 cm d'épaisseur dont la composition est la suivante :

SO^4Cu	25 g
$\text{Cr}^2\text{O}^7\text{K}^2$	1 g
Eau distillée	1000 g

La détermination de la composition convenable a été faite en mettant le filtre liquide devant la fente d'entrée du monochromateur et en cherchant, par tâtonnement, la composition pour laquelle la sensibilité de l'ensemble (cellule + filtre) se rapproche le plus de celle de l'œil.

La courbe de sensibilité spectrale de l'ensemble (cellule + filtre) est donnée sur

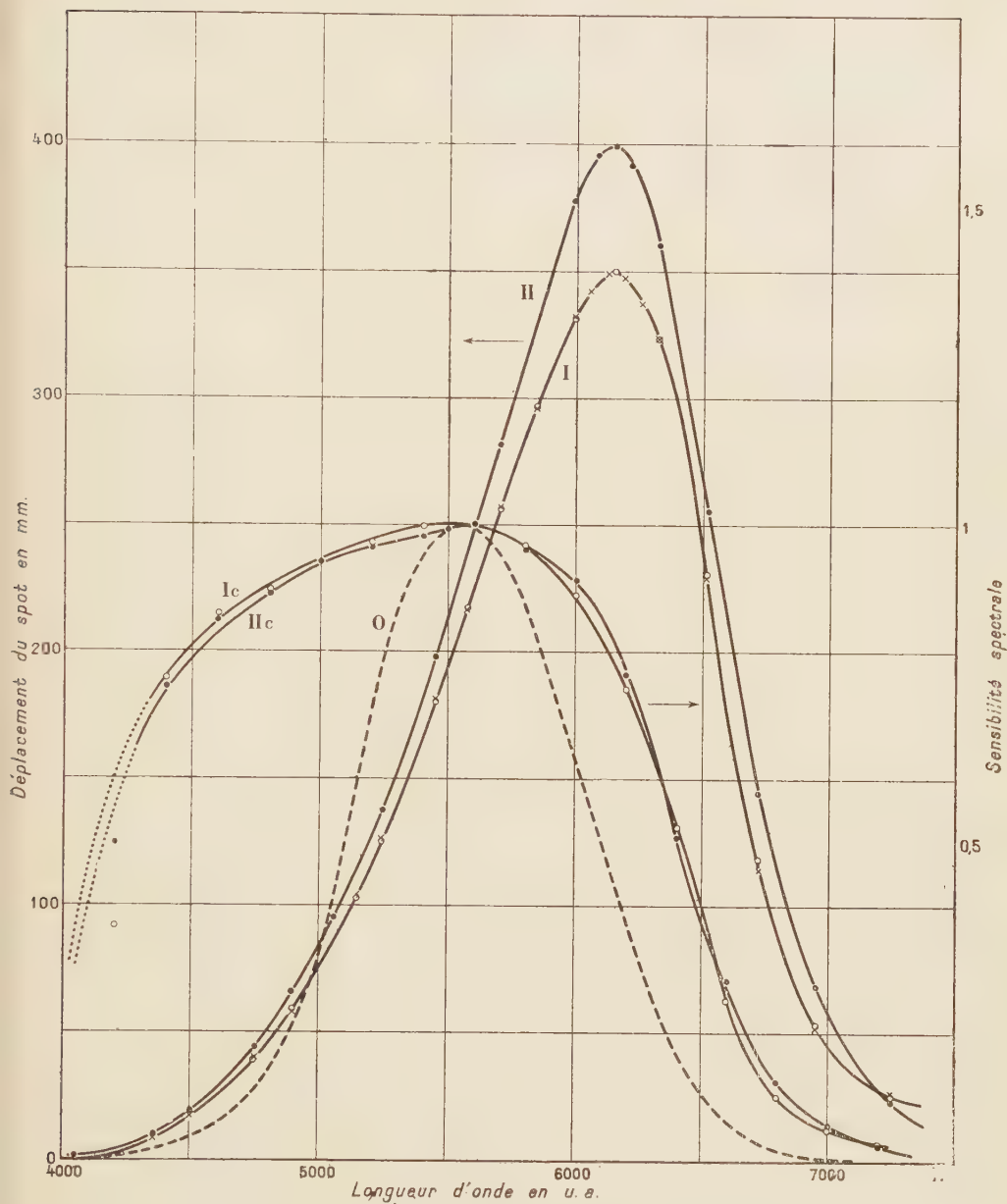


FIG. 8. — I Déplacement du spot (cellule R. 2).
 II — (cellule S. 41).
 I_c Sensibilité spectrale de la cellule R. 2.
 II_c — S. 41.
 O Sensibilité spectrale de l'œil normal.

la figure 9 (courbe 1). Sur la même figure, on a représenté également la courbe de sensibilité spectrale de l'œil (courbe 0). Les écarts sont alternativement positifs et négatifs, et d'ailleurs suffisamment faibles pour qu'on puisse atteindre une précision suffisante dans les comparaisons photométriques hétérochromes.

Nous donnerons plus loin la précision que l'on obtient dans la comparaison des sources incandescentes de couleurs différentes.

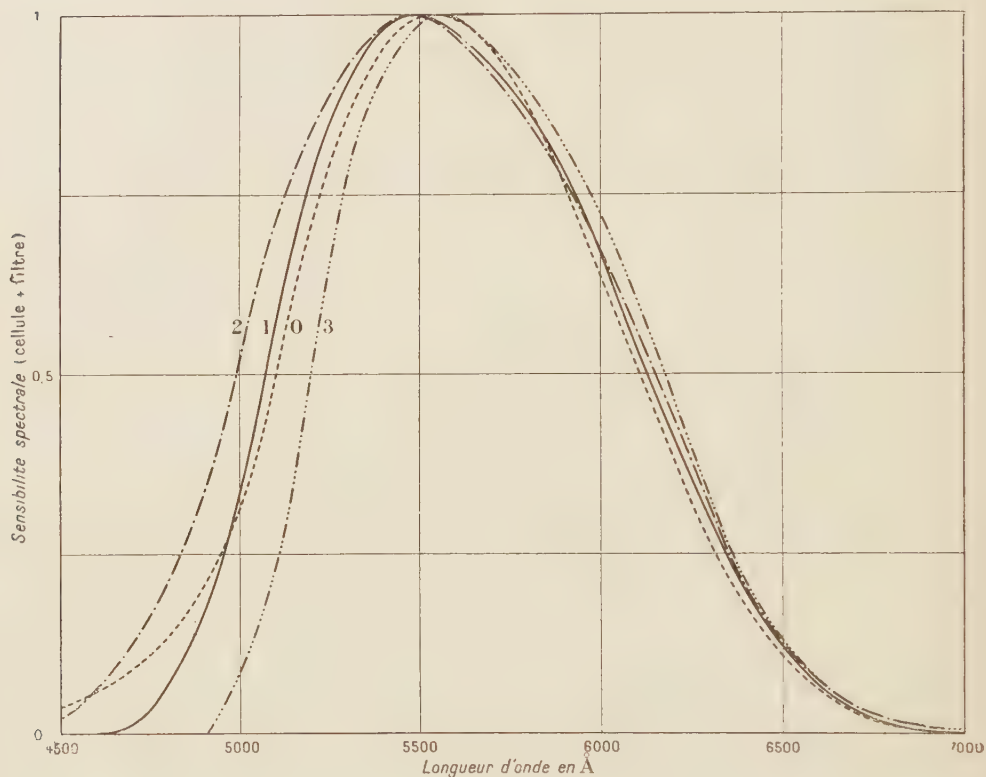


FIG. 9.

On a reproduit, à titre d'indication, sur la même figure, deux courbes (2, 3) relatives à deux autres compositions du filtre liquide.

	Courbe 2	Courbe 3
SO ⁴ Cu	22 g	22 g
Cr ² O ³ K ²	0,5	2
Eau distillée	1000	1000

Comme ces courbes l'indiquent, le domaine d'absorption de chacune des matières colorantes constituant le filtre est suffisamment distinct de l'autre pour qu'on puisse obtenir, dans une région déterminée du spectre, la coïncidence par-

faite de la courbe de sensibilité spectrale de la cellule munie du filtre avec celle de l'œil, en agissant sur la dose de l'un des composants seulement.

Un filtre liquide présente l'inconvénient d'être d'un emploi moins commode qu'un filtre constitué par des verres colorés : par contre, il présente l'avantage d'être d'une réalisation simple, ce qui est important, étant donné que la sensibilité spectrale des cellules actuellement en usage, étant susceptible de modifications quelquefois importantes, demande un contrôle assez fréquent et, le cas échéant, l'ajustement du filtre.

Signalons, enfin, que le filtre liquide, indiqué plus haut, absorbe complètement le rayonnement infrarouge et augmente corrélativement la sécurité des mesures.

Remarque : Dans les applications photométriques concernant les sources à spectre continu couramment utilisées ($T_c = 2000$ à 3000° K), il importe de corriger aussi parfaitement que possible la sensibilité spectrale de la cellule, surtout dans la région des grandes longueurs d'onde (jaune... rouge), où l'énergie rayonnée par les sources sus-indiquées est de 3 à 10 fois plus grande que dans la zone de courtes longueurs d'onde.

CHAPITRE II.

EMPLOI DES CELLULES A COUCHE D'ARRÊT DANS LA PHOTOMÉTRIE DES LAMPES

En tenant compte des considérations qui précèdent, on peut effectuer, à l'aide des cellules à couche d'arrêt, toutes les déterminations des grandeurs photométriques usuelles. Dans ce qui suit, nous nous bornerons à l'étude de leur emploi dans la comparaison des lampes en indiquant brièvement les montages et les méthodes utilisés.

I. — Comparaisons des lampes homochromes.

1° *Méthode directe ou de déviation simple.* — Dans cette méthode, on considère le courant débité, dans un circuit de faible résistance, comme une fonction linéaire du flux lumineux.

La comparaison d'un flux à un autre, constituant l'étalon, se fait en déterminant le rapport des déviations d'un galvanomètre de faible résistance branché sur la cellule.

La méthode est simple et à lecture directe et, de plus, elle nécessite un appareillage réduit au minimum.

Cette méthode ne peut pas servir en photométrie de précision. La précision

obtenue atteint 1 % dans le cas le plus favorable où les intensités des flux à comparer ne sont pas de grandeurs très différentes. Par contre, c'est la seule méthode applicable dans la construction des appareils enregistreurs.

2° *Méthodes applicables aux mesures de précision.* — Les méthodes applicables aux mesures de précision sont :

A. MÉTHODE DES DÉVIATIONS CONTRÔLÉES. — La source à étudier X est comparée à la source étalon S de la façon suivante :

1° On éclaire la cellule à l'aide de la source S ; on détermine le courant débité par la cellule, soit i_s ce courant.

2° On éclaire la cellule à l'aide de la source à étudier X ; on détermine le courant débité i_x .

3° On éclaire de nouveau la cellule à l'aide de l'étalon S et on mesure le nouveau courant débité par la cellule.

Si les valeurs du courant i , obtenues dans les premier et troisième cas, sont égales, on en déduit que la cellule n'a pas subi de variations pendant les mesures.

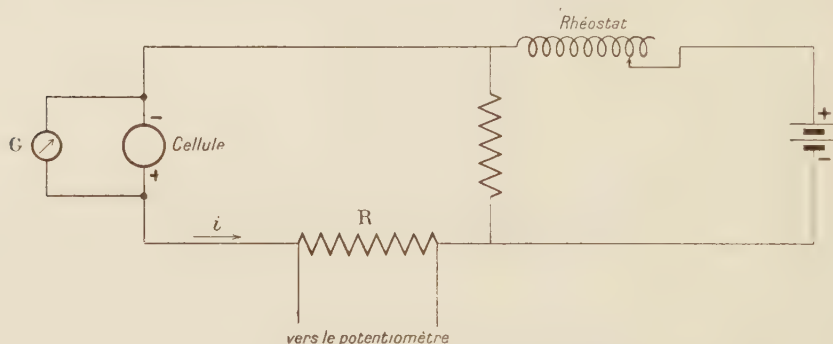


FIG. 10. — Lorsque le galvanomètre G reste au zéro, la chute de potentiel ohmique dans la cellule est rigoureusement compensée par la force électromotrice photoélectrique. La mesure du courant i peut s'effectuer par la méthode potentiométrique, en mesurant la chute de potentiel dans une résistance fixe R mise en série avec la cellule.

Dans ces conditions, le rapport $i_x i_s$ donnera le rapport des deux flux et par conséquent des deux intensités.

Pour obtenir des résultats présentant une certaine précision, il faut mesurer le courant de court-circuit réel. On y parvient en employant une méthode de compensation. Le schéma du montage à réaliser est donné sur la figure 10.

De plus, il faut tenir compte du phénomène de fatigue et de l'influence de l'éclairement sur la sensibilité.

L'obtention d'une haute précision dans l'emploi de cette méthode nécessite l'utilisation de sources étalons produisant sur la cellule une intensité d'éclairement voisine de celle produite par les sources à photométrer. Dans ces conditions, on peut arriver à une précision de 0,1 %.

B. MÉTHODE DE « ZÉRO » OU DE DÉVIATION FIXE. — Dans cette méthode, la cellule ne sert que comme indicateur d'égalité de deux flux, que l'on substitue l'un à l'autre. Autrement dit, dans la comparaison de deux lampes, l'éclairement produit par ces lampes sur la cellule reste invariable.

La méthode permet d'atteindre de très grandes précisions. En effet, l'écart maximum entre deux lectures successives ne dépassant pas 1/1000, il est probable que l'on dépasse la précision de 1/1500 en prenant la moyenne de 10 mesures et en appliquant la méthode des mesures croisées.

Dans l'application de cette méthode, les qualités exigées de la cellule sont la stabilité et la sensibilité. Les cellules au sélénium, de construction récente, ont une stabilité parfaite et une sensibilité quelquefois surabondante.

Le montage à réaliser ne diffère pas beaucoup de celui utilisé dans les comparaisons photométriques visuelles. Signalons, toutefois, que dans l'emploi de la cellule comme appareil de comparaison, on n'utilise aucune source tare ; d'autre part, le montage comporte un dispositif permettant la substitution rapide des lampes à comparer.

L'emploi de cette méthode ne demande pas l'utilisation d'une caractéristique définie de la cellule. En effet, celle-ci ne servant que comme instrument de zéro, on peut mesurer, indifféremment, le courant débité dans un circuit extérieur, ou la f. é. m. aux bornes de la cellule.

Dans nos mesures, c'est la f. é. m. aux bornes que nous mesurons à l'aide d'un potentiomètre.

Pour la comparaison de deux lampes, on procédait de la façon suivante :

La cellule étant fixée rigidement sur un banc photométrique, est protégée contre la lumière parasite à l'aide de diaphragmes ;

1° On l'éclaire à l'aide de la lampe étalon, placée à une distance fixe de la cellule, et on mesure la f. é. m. aux bornes ;

2° On l'éclaire à l'aide de la lampe à étudier dont on a réglé au préalable, approximativement, la distance à la cellule jusqu'à obtention, aux bornes de celle-ci, de la même f. é. m., ou plus exactement d'une f. é. m. très voisine. La déviation du galvanomètre de mesure permet de calculer la différence des éclairagements, par conséquent la correction à faire subir à la distance de la lampe à la cellule grâce à un étalonnage préalable.

Le rapport des intensités lumineuses des deux lampes est déduit du rapport des carrés des distances.

Remarque (1) : Notons que, dans la deuxième opération, il n'y a pas lieu de s'astreindre à ramener le galvanomètre à zéro en réglant exactement la distance de la lampe à la cellule. Cette distance étant réglée à quelques millimètres près, la correction est en général faible.

D'autre part, étant donné la grande sensibilité du montage électrique que l'on peut assurer par un choix convenable du galvanomètre, la correction de la dis-

tance peut être faite avec plus de précision par la lecture des déplacements du spot que par celle des déplacements de la source. Voici, à titre d'indication, les déplacements du spot, dans le cas de notre installation, pour un déplacement de la lampe égal à 1 centimètre (lampe de 50 bougies placée à 2 mètres de la cellule) :

	Déviati <u>o</u> n du spot.
Cellule R. 1	120 mm
Cellule R. 2	45 mm
Cellule S. 41.....	250 mm

Remarque (2). — La méthode présente l'inconvénient d'utiliser des montages encombrants. Pratiquement, elle n'est applicable que dans les cas où le rapport des intensités lumineuses des deux lampes à comparer ne dépasse pas environ 20. Dans le cas où ce rapport serait très grand, on doit avoir recours à un dispositif de réduction du flux. Or, parmi ces dispositifs, ce sont les secteurs tournants qui pourraient être utilisés avec sécurité ⁽¹⁾ si la loi de TALBOT était valable dans le cas des cellules ; malheureusement, ce n'est pas le cas, comme nous allons le voir tout à l'heure.

Emploi des secteurs tournants. — Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'inertie des cellules à couche d'arrêt peut avoir un certain effet dans l'emploi des secteurs tournants. En effet, rien ne prouve que la cellule se comporte exactement de la même façon, du point de vue de l'inertie lumineuse, dans le cas où on l'éclaire et dans le cas où on interrompt l'éclairement.

Cependant, étant donné la petitesse de l'effet, il est probable qu'il n'influence pas, de façon perceptible, le résultat des mesures.

Le fait que la loi de TALBOT ne se trouve pas vérifiée dans le cas des cellules étudiées réside, en premier lieu, dans ce que l'intensité moyenne du courant débité par une cellule à couche d'arrêt, sous l'action d'un flux modulé, n'est pas une fonction définie du flux ; cette intensité dépend, toutes choses égales, de la fréquence d'interruption du flux ⁽²⁾.

Pour nous rendre compte de l'importance de l'écart à la loi de TALBOT, nous avons mesuré la transmission lumineuse d'un secteur en utilisant la cellule S.41. L'expérience montre que la transmission mesurée est toujours inférieure à la transmission réelle que l'on mesure géométriquement. L'écart (en pour cent) entre la transmission mesurée et la transmission réelle est d'autant plus grand que la transmission est plus petite.

A titre d'exemple, nous reproduisons, page suivante, certains résultats expérimentaux :

(1) Voir la discussion des caractéristiques de différents dispositifs dans la partie (1), p. (18).

(2) Fait facilement compréhensible si l'on examine le circuit équivalent d'une cellule à couche d'arrêt.

Fréquence d'éclairement de la cellule	Transmission mesurée à l'aide de la cellule	Transmission réelle	Ecart
60 cycles/seconde	0,542	0,551	2 %
	0,660	0,667	1 %

II. — Photométrie hétérochrome.

Les cellules au sélénium peuvent donner, sans emploi de filtres, des résultats suffisamment précis dans la comparaison des lampes à incandescence dont les températures de couleur ne diffèrent pas de plus de 200°. En effet, ces cellules présentent, par rapport à l'œil, un excès de sensibilité, d'une part dans la région rouge, et d'autre part dans la région des courtes longueurs d'onde. Par conséquent, dans la comparaison de deux lampes, de températures de couleur différentes, ces deux excès de sensibilité auront des effets contraires et le résultat des mesures n'en sera pas très affecté. On a donné, ci-dessous, les chiffres obtenus dans la comparaison d'une lampe à filament de carbone ($T_C = 2080^\circ \text{ K}$) et d'une lampe à filament de tungstène dans le vide ($T_C = 2260^\circ \text{ K}$).

Lampe W. F. 6	Intensité nominale (mesurée par extrapolation spectrophotométrique)	Intensité obtenue par mesure directe à l'aide de la cellule
Cellule S. 41	49,56	49,24
Cellule R. 2	»	49,38

Comme on le voit, le résultat est exact à 0,6 % près. Par contre, sans emploi de filtres correcteurs, elles peuvent conduire à des erreurs graves dans la mesure du facteur de transmission totale d'un filtre par exemple, et à plus forte raison dans la mesure de l'intensité lumineuse des sources à spectre de raies.

Nous avons obtenu de bons résultats par l'emploi du filtre liquide décrit plus haut (p. 70).

Voici les chiffres relatifs à la mesure du facteur de transmission lumineuse du verre bleu R.2-28 effectuée au moyen de sources de températures de couleur différentes.

T_C de la source utilisée	Facteur de transmission du filtre R.2-28	
	Mesures directes sans emploi de filtre correcteur	Mesures avec filtre correcteur
2080°K	0,544	0,528
2260	0,550	0,525
2400	0,553	0,526
2600	0,560	0,523
		0,525 ₅

La valeur obtenue (0,525) ne diffère que de 0,2 % de celle actuellement admise qui est 0,5245 (1).

(1) Voir, au sujet de la transmission du filtre bleu, p. 26.

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE (TROISIÈME PARTIE)

LISTE A

(Auteurs cités dans le texte.)

1. P. H. GEIGER. — Brevet de la Westinghouse Brake C^o (Brit. Pat. 277610, U. S. A., 14, 9, 1926).
2. B. LANGE. — *Phys. Zeits.*, 31 (1930), 139, 964.
3. W. GRAFFUNDER. — *Phys. Zeits.*, 31 (1930), 375.
4. W. SCHOTTKY. — *Phys. Zeits.*, 31 (1930), 913.
5. L. DUHME et W. SCHOTTKY. — *Naturwiss.*, 18 (1930), 735.
6. W. G. ADAMS et R. E. DAY. — *Proc. Roy. Soc.*, 25 (1877), 113.
7. C. E. FRITTS. — *Proc. Amer. Ass. for Advancements of Sciences*, 33 (1883), 97.
8. L. BERGMANN. — *Phys. Zeits.*, 32 (1931), 286.
9. B. LANGE. — *Naturwiss.*, 19 (1931), 525.
10. O. W. AUWERS et H. KERSCHBAUM. — *Ann. d. Phys.* (1930), 129.
11. W. SCHOTTKY. — *Phys. Zeits.*, 32 (1931), 833.
12. L. DUNOYER. — C. R. Congrès Int. Elect. V. 2 (1932), 190.
13. G. LIANDRAT. — *Rev. Gén. Elect.*, 35 (1934), 424, 474.
14. G. A. BOUTRY. — Phénomènes photoélectriques et leurs applications (1936), Paris.
15. H. SIMON et R. SUHRMANN. — *Lichtelectrische Zellen und Ihre Anwendung* (1932), Berlin.
16. V. R. ZWORKIN et E. D. WILSON. — *Photocells and their Applications* (1932), London.
17. B. LANGE. — *Naturwiss.*, 25 (1931), 525 ; *Phys. Zeits.*, 32 (1931), 850.
18. E. FERENCZ et I. URBANEK. — *Rev. d'Optique* (1935), 318.
19. G. RIBAUD. — *Traité de Pyrométrie optique*, tableau 67.

LISTE B

(Divers.)

1. W. BULIAN. — Recherches sur les cellules photoélectriques à oxydure de cuivre. *Phys. Zeits.*, 34 (1933), 745.
2. L. BERGMANN. — Recherches et mesures avec les cellules photoélectriques à couche d'arrêt au sélénium. *Phys. Zeits.* (1933), 227.
3. C. LAPICQUE. — Effet non additif de radiations différentes sur les piles à oxyde de cuivre. *C. R.*, 196 (1933), 131.
4. P. GÖRLICH. — Variation de la sensibilité des cellules photoélectriques à couche d'arrêt avec la fréquence de l'éclairement. *Zeits. Tech. Phys.*, 14 (1932), 144.
5. L. A. WOOD. — Circuit équivalent de la couche d'arrêt. *Rev. Sc. Instr.*, 5 (1934), 295.
6. A. GOUFFÉ. — Emploi des cellules à couche d'arrêt en photométrie. Rapport au Comité français de l'Eclairage (1934).
7. COHU. — Cellules à couche d'arrêt. Rapport au Comité français de l'Eclairage (1934).
8. H. C. HAMAKER et W. F. BEEZHOLD. — Emploi d'une cellule à couche d'arrêt au sélénium pour la mesure de faibles intensités. *Physica*, 1 (1934), 119.
9. M^{me} ROY-POCHON. — Sur les cellules photoélectriques dites à couche d'arrêt. *C. R.*, 198 (1934), 2083.
10. G. LIANDRAT. — Tentatives d'application des lois de l'émission aux photoéléments à couche d'arrêt. *C. R.*, 198 (1934), 1028.
11. R. H. VARIAN. — Contribution à la théorie des cellules à couche d'arrêt. *Phys. Rev.* (1934), 1051.

94. 95. FROSTEN. — Remarque sur la nature du contact parabolique à l'origine de certaines courbes algébriques. *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 1896, 75.
96. G. LACROIX. — Remarque sur parabolisme à l'origine d'une courbe de courbure et l'intersection d'hyperbolas avec une courbe. *C. R.*, 1896, 1896.
97. 98. G. LACROIX et L. KATZ. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
99. 100. 101. M. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
102. 103. 104. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
105. 106. 107. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
108. 109. 110. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
111. 112. 113. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
114. 115. 116. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
117. 118. 119. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
120. 121. 122. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
123. 124. 125. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
126. 127. 128. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
129. 130. 131. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
132. 133. 134. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
135. 136. 137. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
138. 139. 140. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
141. 142. 143. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
144. 145. 146. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
147. 148. 149. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
150. 151. 152. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
153. 154. 155. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
156. 157. 158. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
159. 160. 161. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
162. 163. 164. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
165. 166. 167. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
168. 169. 170. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
171. 172. 173. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
174. 175. 176. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
177. 178. 179. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
180. 181. 182. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
183. 184. 185. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
186. 187. 188. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
189. 190. 191. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
192. 193. 194. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
195. 196. 197. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.
198. 199. 200. L. LACROIX. — Remarque sur l'intersection d'une courbe d'ordre 3 avec une courbe. *Page. Zeits.*, 75, 1896, 504.

ANNEXE

APPAREILS ET MESURES ÉLECTRIQUES

On sait que l'intensité lumineuse des lampes incandescentes varie considérablement avec leur régime. Une variation relative de $1/10\ 000$ du courant d'alimentation produit une variation de $1/1\ 000$ environ de l'intensité lumineuse. Il s'ensuit que le régime sous lequel ces lampes sont alimentées doit être connu avec une très grande précision.

Nous allons décrire succinctement, dans ce qui suit, la méthode utilisée dans les mesures électriques et donner un bref aperçu des caractéristiques des appareils employés.

Batteries. — L'alimentation des lampes est assurée par des batteries du laboratoire (accumulateurs de 120 ampères-heures). La capacité de ces batteries étant suffisamment grande, l'intensité du courant dans les lampes, lorsque celles-ci sont en régime, ne baisse que de 1 à $2/1000$ par heure ; de sorte que en réglant le courant toutes les 5 minutes, l'effet de la décharge des accumulateurs sur le résultat des mesures est négligeable. Dans nos mesures, le régime des lampes étant contrôlé après chaque pointé photométrique, toute incertitude provenant de la décharge des batteries est évitée.

Rhéostats. — Le réglage des courants s'effectue à l'aide des rhéostats à fiches combinés à des rhéostats à curseur de très faibles résistances. Dans les cas où le courant était de l'ordre d'une dizaine d'ampères, on utilisait, au lieu des rhéostats à curseur, des rhéostats à contact de mercure, constitués par une tige de constantan plongeant dans du mercure.

Mesures des courants-potentiométriques. — Les courants étaient mesurés par la méthode potentiométrique.

Le courant à mesurer I passe dans une résistance étalon R mise en série avec la lampe étudiée. On mesure la différence du potentiel $R I$ aux bornes de cette résistance à l'aide d'un potentiomètre.

Nous avons utilisé, dans la plupart de nos mesures, des potentiomètres à déviation, que nous avons construits et étalonnés nous-même.

Le schéma d'un tel potentiomètre est donné sur la figure 1.

On oppose la différence de potentiel à mesurer $R I$ à celle qui existe entre deux bornes, convenablement choisies, du potentiomètre ; soit E cette différence de

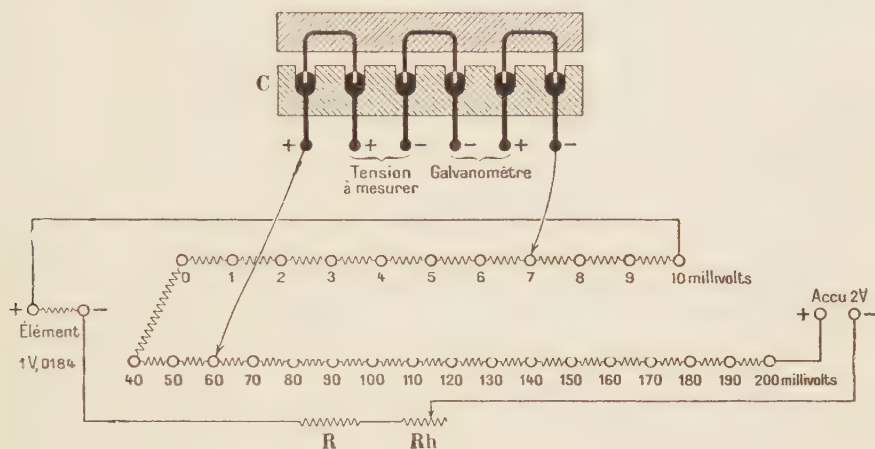


FIG. 1. — Schéma d'un potentiomètre à déviation de 200 mV. Le courant potentiométrique (0,02 A) est produit à l'aide d'un accumulateur de 2 volts ; son réglage s'effectue au moyen du rhéostat à curseur Rh. C représente un combinateur à mercure. Ce combinateur comportant plusieurs rangées de six trous permet la mesure simultanée de plusieurs tensions. Le dessin représente le cas où la tension à mesurer serait de 67 millivolts environ.

potentiel. En général, E n'égale pas parfaitement $R I$, et le galvanomètre de mesure ne reste pas au zéro. Si le spot se déplace de n divisions, on a :

$$R I = E + S_e n,$$

où S_e désigne le coefficient de la sensibilité du montage que l'on détermine dans une expérience préalable.

Résistances étalons. — Nous avons utilisé des résistances étalons construites par la Maison SIEMENS. Le coefficient de température de ces résistances, qui sont en manganine, étant très faible ($1/200\,000$ par degré), elles conviennent particulièrement pour les mesures potentiométriques. Les résistances utilisées étaient de 0,01, 0,1 ou 1 ohm selon la grandeur du courant à mesurer.

Galvanomètres. — Pour les mesures potentiométriques, on s'est servi d'un galvanomètre Moll du type courant (résistance du cadre = 45 ω), dont la sensibilité aux courants est de l'ordre de 10^{-9} A (l'échelle étant placée à 2 mètres).

Ce galvanomètre ne pouvait pas convenir aux mesures de sensibilité spectrale de la cellule, où les courants à mesurer sont extrêmement faibles. Pour ces mesures, nous nous sommes servi d'un galvanomètre Moll de très grande sensibilité, dont

la sensibilité aux courants varie entre 10^{-11} et $0,8 \cdot 10^{-10}$ A suivant l'emplacement du shunt magnétique.

La résistance intérieure de ce galvanomètre est de $340 \, \Omega$; par conséquent, ses déviations peuvent être considérées comme proportionnelles aux flux lumineux, dans le cas où l'on mesure la sensibilité spectrale de la cellule. En effet, la loi de proportionnalité est valable pour les petits éclairissements, même dans le cas où l'on mesure le courant débité dans un circuit de résistance non négligeable vis-à-vis de celle de la cellule.

* * *

En terminant, je me fais un agréable devoir de présenter à M. le Professeur G. RIBAUD le témoignage de ma profonde reconnaissance pour le constant intérêt qu'il a pris à mes recherches, pour les enseignements quotidiens et pour les bienveillants conseils qu'il m'a prodigués.

J'adresse mes remerciements à MM. A. GOUFFÉ et Y. LAURE, à MM. les ingénieurs et au personnel du Laboratoire des Recherches physiques de la Société du Gaz de Paris, dont la collaboration et les directives m'ont été d'une aide précieuse.

Que la Société du Gaz de Paris trouve ici mes plus vifs remerciements pour avoir mis à ma disposition le matériel dont je me suis servi.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté :

Cellules photoémissives

Vu et approuvé :

Paris, le 28 juin 1937.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

CH. MAURAIN.

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

S. CHARLÉTY.

2397. — Imp. Jouve et Cie, 15, rue Racine, Paris, — 7-1937
